

**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)

“ ” 202 р.

Магістерська дисертація

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

(код і назва спеціальності)

на тему: Автоматизоване проєктування оптичних систем ширококутних окулярів

Виконав: студент 2 курсу, групи ПО-11 мп

(шифр групи)

Крижній Андрій Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н. Сокурєнко В.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Стартап-проєкт д.е.н., проф., Бояринова К.О.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(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**

Крижнього Андрія Ігоровича

1. Тема дисертації «Автоматизоване проектування оптичних систем ширококутних окулярів», науковий керівник дисертації доцент, к.т.н. Сокурєнко В.М. затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації «06» грудня 2022 р.
3. Об'єкт дослідження: окуляри з широким кутом поля зору та процес проектування їх оптичних систем.
4. Предмет дослідження: метод автоматизованого параметричного синтезу оптичної системи ширококутних окулярів.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - 5.1. Проаналізувати сучасні відомі методи локальної та глобальної оптимізації. Обрати найефективніший метод для подальшого застосування у процесі параметричного синтезу оптичної системи окуляра з широким кутом поля зору.
 - 5.2. Дослідити дієздатність сучасних методів автоматизованого проектування оптичних систем та обрати найдієвіший для подальшого застосування.

5.3. Здійснити експериментальну перевірку запропонованого методу шляхом автоматизованого параметричного синтезу конкретних оптичних систем ширококутних окулярів.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

7. Орієнтовний перелік публікацій

7.1. Крижній А. І., Сокурено В. М. Автоматизований розрахунок ширококутного 8 лінзового окуляра з полем зору 90° // 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. 57-60.

7.2. Сокурено В. М. Автоматизований параметричний синтез ширококутних окулярів з полем зору 90° / В. М. Сокурено, А.І. Крижній // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. – Хмельницький, 2022. – Прийнято редакцією до друку 31.10.2022.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Стартап-проект	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 ширококутних окулярів	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 методів автоматизованого проектування оптичних систем	12.10.2022	

5	Експериментальна перевірка	26.10.2022	
6	Аналіз отриманих результатів	10.11.2022	
7	Стартап-проект	17.11.2022	
8	Оформлення рукопису	04.12.2022	

Студент

(підпис)

А. І. КРИЖНІЙ

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В. М. СОКУРЕНКО

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Автоматизований синтез оптичних систем ширококутних окулярів

Обсяг роботи – 107 сторінок

Кількість ілюстрацій – 46

Кількість таблиць – 34

Кількість додатків – 0

Кількість джерел за переліком посилань – 59

Актуальність теми. Ширококутні окуляри широко використовуються у астрономії та мікроскопії. Їх застосовують для отримання великого поля зору при спостереженні зі збереженням якості зображення. Головною особливістю окулярів з широким кутом поля зору є те, що вони дозволяють спостерігачу бачити значно більше деталей без потреби зміщувати прилад, що, в свою чергу, може призвести до дефокусування.

Сучасні методи проєктування оптичних систем ширококутних окулярів базуються на оптимізації готових оптичних систем або на застосуванні торії аберацій третього та п'ятого порядків. Недоліком першого методу є необхідність застосування порівняно якісних початкових оптичних систем, які мають досить якісне зображення. Недоліком другого методу є його обмеженість.

Саме тому розробка окулярів з широким кутом поля зору ефективним та простим методом є актуальною.

Мета дослідження: доведення можливості автоматизованого параметричного синтезу оптичних систем ширококутних окулярів.

Об'єкт дослідження: окуляри з широким кутом поля зору та процес проєктування їх оптичних систем.

Предмет дослідження: метод автоматизованого параметричного синтезу оптичної системи ширококутних окулярів.

Ключові слова: оптична систем, ширококутний окуляр, окуляр, глобальна оптимізація, диференційна еволюція, адаптивна диференційна еволюція Коші, автоматизований розрахунок, параметричний синтез.

ABSTRACT

Automated synthesis of optical systems of ultra-wide-angle eyepieces

Number of pages – 107

Number of figures – 46

Number of tables – 34

Number of applications – 0

Number of references – 59

Topic relevance. Wide-angle eyepieces are widely used in astronomy and microscopy. They are used to obtain a large field of view during observation while maintaining image quality. The main feature of eyepieces with a wide field of view is that they allow the observer to see much more detail without the need to move the device, which in turn can lead to defocusing.

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

That is why the development of ultra-wide-angle eyepieces by an effective and simple method is relevant.

Research goal: proving the possibility of automated parametric synthesis of optical systems of wide-angle eyepieces.

Object of research: eyepieces with a wide field of view and the process of designing their optical systems.

Subject of research: method of automated parametric synthesis of the optical system of wide-angle eyepieces.

Keywords: optical system, wide-angle eyepiece, eyepiece, global optimization, differential evolution, adaptive Cauchy differential evolution, automated calculation, parametric synthesis.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ.....	11
1.1 Окуляр в оптичній системі	11
1.2 Складові окуляра	11
1.3 Основні параметри оптичних систем окулярів	Ошибка! Закладка не определена.
1.4 Класифікація та різновиди окулярів.....	14
1.4.1 Окуляр Рамсдена	15
1.4.2 Окуляр Кельнера	Ошибка! Закладка не определена.
1.4.3 Окуляр Ерфле	16
1.4.4 Ширококутний окуляр.....	17
1.5 Висновки до першого розділу.....	28
РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	29
2.1 Методи локальної оптимізації	29
2.1.1 Методи нульового порядку	30
2.1.2 Методи першого порядку	36
2.1.3 Методи другого порядку	39
2.1.4 Висновки до методів локальної оптимізації.....	43
2.2 Методи глобальної оптимізації.....	43
2.2.1 Методи глобальної оптимізації на основі детермінованих підходів	45
2.2.2 Методи глобальної оптимізації на основі евристичних та метаевристичних підходів.....	48
2.2.2.1 Еволюційні алгоритми	48
2.2.2.2 Алгоритми ройового інтелекту.....	53
2.2.3 Методи глобальної оптимізації на основі стохастичних та термодинамічних підходів.....	58
2.2.4 Висновки до методів глобальної оптимізації	60

2.3 Висновки до другого розділу	60
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА.....	62
3.1 Запропонований підхід	62
3.2 Алгоритм автоматизованого розрахунку	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Приклади чисельного моделювання	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.1 Загальні положення.....	67
3.3.2 Параметричний синтез восьмилінзового ширококутного окуляра, зі зменшеною класичною дисторсією	68
3.3.3 Параметричний синтез серії ширококутних окулярів, виправлених на тета-дисторсію.....	74
3.4 Висновки до третього розділу.....	80
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП–ПРОЄКТУ.....	82
4.1 Опис ідеї проєкту	82
4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту	84
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту	85
4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту	93
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	95
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	98
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102

ВСТУП

Окуляр є важливою складовою будь-якої оптичної системи, адже саме за допомогою нього спостерігач бачить утворене оптичною системою зображення. Вони широко використовуються у оптичних системах біноклів, далекомірів, телескопів, зорових труб, мікроскопів та інших.

Важливим параметром будь-якого окуляра є його поле зору. Чим більше поле зору, тим більше деталей та подробиць може спостерігати користувач. Саме тому, розробники окулярів прагнуть максимально збільшити цей параметр та, при цьому, максимально зберегти якість зображення. У наш час існують ширококутні окуляри, які забезпечують досить велике поле зору та досить гарну якість зображення. Особливо важливу роль ширококутні окуляри відіграють саме в телескопах та мікроскопах. Перевагами ширококутних окулярів є великий кут поля зору, гарна якість зображення та добре виправлені аберації.

На сьогоднішній день синтезувати якісні ширококутні окуляри, які будуть задовольняти зростаючі потреби, досить складно. Розглянутий у даній роботі підхід значно спрощує процес синтезу ширококутних окулярів, зберігаючи при цьому високу якість зображення.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Окуляр в оптичній системі

Окуляр – це елемент оптичної системи, що звернений до ока спостерігача, що збільшує утворене об'єктивом зображення. Окуляр розміщують так, щоб проміжне зображення знаходилося у його фокальній площині. У цьому випадку промені, випущені з будь-якої точки предмета, розповсюджуються після окуляра паралельним пучком [1, 2].

Окуляр складається з декількох лінзових елементів у корпусі з тубусом на одному кінці. Корпус має форму, що підходить для спеціального отвору приладу, до якого він прикріплюється. При цьому, зображення можна сфокусувати, наближаючи та віддаляючи окуляр від об'єктиву. Більшість приладів мають механізм фокусування, який дозволяє переміщувати вал, на якому встановлений окуляр, без необхідності маніпулювання самим окуляром.

Окуляр застосовується у багатьох оптичних приладах (далекомір, бінокль, мікроскоп, телескоп та інші), які призначені для спостереження зображення. Окуляр є однією з найважливіших складових майже будь-якої класичної оптичної системи, оскільки саме він дозволяє спостерігати зображення, що утворене оптичною системою перед ним [1, 3].

1.2 Складові окуляра

Окуляр, зазвичай, складається з двох блоків: оптичного та механічного. Оптичний блок представляє з себе групу лінз деякої визначеної оптичної системи. Механічний блок, у сучасному виконанні, – це корпус окуляра, у якому закріплений оптичний блок та, так звана, посадкова «втулка», яка, зазвичай, має стандартний діаметр 1,25" або 2" [4].

На внутрішній стороні посадкової втулки окуляра часто нарізана маленька різьба для можливості кріплення світлофільтрів. Біля очної лінзи розміщене маленьке гумове кільце – це наочник. Його задача – захищати око спостерігача від потрапляння паразитних променів [4].

Після встановлення окуляра, наприклад, в окулярний вузол телескопа, у нього вводиться у пучок світла, зібраний об'єктивом. У більшості оптичних схем присутня, так звана, польова діафрагма, яка, зазвичай, встановлена у фокальній площині. Як правило, саме польова діафрагма визначає поле зору окуляра, у якому окуляр буде якісне зображення, а крайові зони, наповнені різними спотвореннями, відсікає діафрагма [4].

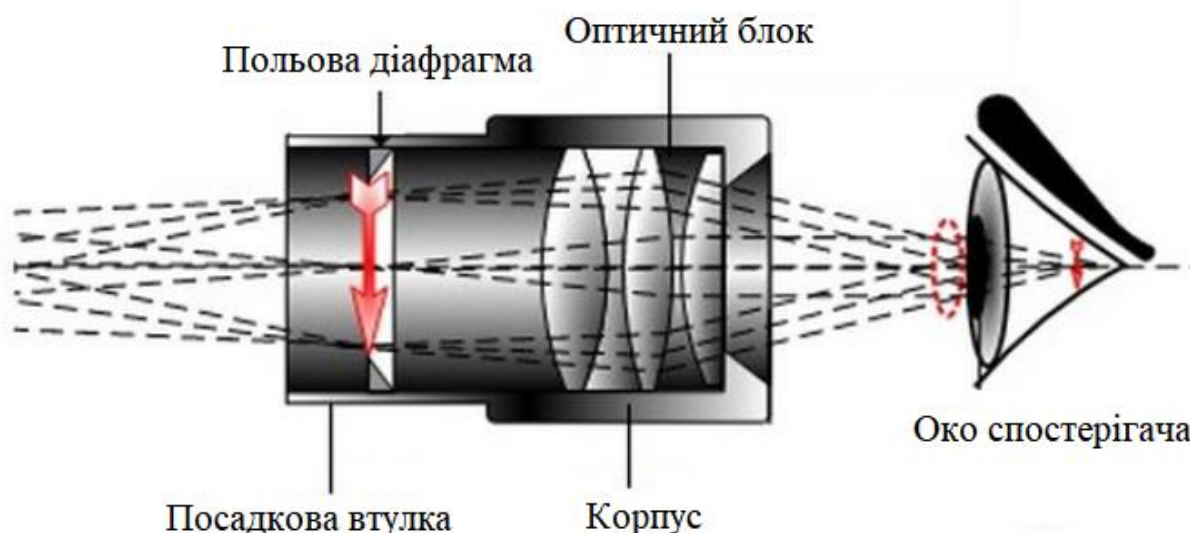


Рисунок 1.1 – Приклад загальної будови окуляра [4]

1.3 Основні параметри оптичних систем окулярів

Основними параметрами окулярів вважаються [5]:

- фокусна відстань $f'_{ок}$;
- збільшення $\Gamma = \frac{250}{f'_{ок}}$;

- кут поля зору $2\omega'$;
- діаметр вихідної зіниці D' ;
- віддалення зіниці S'_p .

Розглянемо найважливіші параметри, які визначають оптичні характеристики окуляра.

Фокусна відстань. Фокусна відстань окуляра – це відстань від його головної площини до тої точки, де промені світла перетинаються в одній точці. У першу чергу, окуляр обирається по фокусній відстані, очікуючи отримати потрібне збільшення. Наближаючись до граничних збільшень, потрібно дотримуватися певної обережності, оскільки навіть дуже якісний, але занадто короткофокусний окуляр, збільшення якого перевищує максимально допустиме для приладу, не побудує якісного зображення [1, 4].

Поле зору. Як правило, для більшості застосування намагаються отримати якомога більше поле зору, оскільки спостерігати за чимось через «замкову щілину» значно гірше та некомфортно, ніж через «вікно». Поле зору визначає, наскільки багато можна побачити через окуляр. Поле зору може змінюватися в залежності від збільшення, що отримується за допомогою приладу, в якому використовується окуляр, та залежить від характеристик самого окуляра [1, 4].

Віддалення зіниці. Відстань між очною лінзою та оком спостерігача називається віддаленням зіниці. На цю величину завжди слід звертати увагу. Якщо ця величина зовсім мала, близько 4–6 мм, то, майже, неминучими будуть дотики до лінз, що викликає дискомфорт при спостереженні. Занадто велике віддалення також небажане, тому що буде важко фіксовано тримати око на визначеній відстані від окуляра. При цьому, також мають значення паразитні промені, які потрапляють до ока. У більшості випадків, найбільш комфортним віддаленням є 15–20 мм [4].

1.4 Класифікація та різновиди окулярів

За призначенням та конструктивними особливостями окуляри поділяються на [5]:

- окуляри телескопічних систем;
- окуляри мікроскопів;
- окуляри автоколімації.

Як окуляри телескопічної системи використовують окуляри Рамсдена, Кельнера, Ерфле першого і другого роду, симетричний окуляр та ширококутний. За характером виправлення аберації, окуляри розділяють на набори. Кожен з наборів містить окуляри з фокусними відстанями: 20, 25, 30, 45, 40, 50 мм [5].

У мікроскопах, як основні типи окулярів, застосовують окуляри Гюйгенса, ортоскопічний, компенсаційний, симетричний та ширококутний. Діоптрійне наведення у цих окулярах може здійснюватися пересуванням окуляра в корпусі мікроскопа уздовж осі [5].

До автоколімаційних окулярів відносять три типи окулярів [5]:

- окуляр–куб;
- окуляр Аббе;
- окуляр Гауса.

Основною задачею окуляра є збільшення зображення, що побудоване попередньою оптичною системою, зазвичай об'єктивом, у фокальній площині приладу. На перший погляд все просто та здається, що для цього достатньо застосування звичайної лупи, з підходящою фокусною відстанню, але на практиці все багатократно ускладнюється. Одиночна лінза буде мати багато різних аберацій, які внесуть свій вкрай негативний вплив на зображення. У найпростішому випадку, необхідно застосувати системи, які складаються хоча б з декількох лінз. Розглянемо декілька найпоширеніших систем [4].

1.4.1 Окуляр Рамсдена

Окуляр Рамсдена – це один з перших неоднолінзових окулярів, які можна зустріти до сих пір. Ця схема була створена виробником наукового та астрономічного обладнання Джесі Рамсденом у 1782 році. Він складається з двох однакових плоско-випуклих лінз і досить непогано коригує сферичну та хроматичну аберації. При цьому астигматизм скорегований досить несуттєво та окуляр має дуже мале віддалення зіниці. Поле зору такого окуляра складає, зазвичай, $35 - 40^\circ$. Окуляри цієї схеми часто зустрічаються як комплектуючі у недорогих моделей телескопів [1, 4].

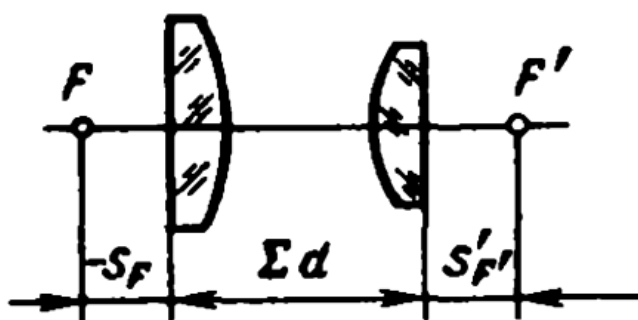


Рисунок 1.2 – Приклад оптичної схеми окуляра Рамсдена [6]

1.4.2 Окуляр Кельнера

Окуляр Кельнера, зазвичай, є найдешевшим із задовільних, тому він здобув велику популярність серед аматорів астрономії. Його розробив Карл Кельнер у 1849 році. Загалом, він представляє з себе покращений окуляр Рамсдена, в якому лише одиночна очна лінза була змінена на ахроматичний блок. Цю схему також називають «ахроматичною схемою Рамсдена». Серед досвідчених візуальних спостерігачів часто знаходяться поціновувачі окулярів класичних схем. Вони вважають, що добре виконаний окуляр, система якого містить три – чотири лінзи, буде завжди працювати краще, ніж навіть самий досконалий, але 9–10 лінзовий. У класичних окулярах однозначно менше поглинання світла та шкідливого відбиття від лінз. Такий окуляр добре працює при середніх та малих збільшеннях, при цьому володіючи фокусами від

15–20 мм до 30–40 мм. Більш короткофокусні модифікації мають ряд неприємних спотворень. Поле зору окуляра, зазвичай, складає близько 40° , але зустрічаються представники і з 50° . Наприклад, такі модифікації досить непогано просвітлених окулярів Кельнера зустрічаються у комплектних наборах телескопів Sky–Watcher [1, 4].

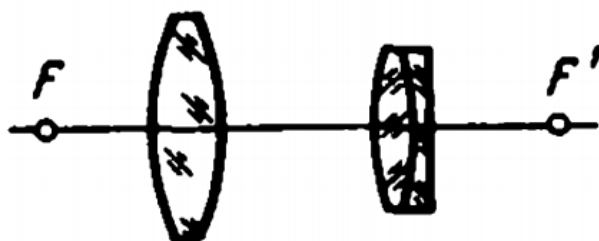


Рисунок 1.3 – Приклад оптичної схеми окуляра Кельнера [6]

1.4.3 Окуляр Ерфле

Окуляр Ерфле у сучасній номенклатурі часто відмічається аббревіатурою WA – Wide Angle (Широкий Кут). Цей окуляр був створений під час Першої світової війни та був описаний Генріхом Ерфле у патенті США №1478704 у 1921 році. Окуляр оптимізований для забезпечення великого поля зору ($60 - 70^\circ$) та має п'яти або шестилінзову конструкцію. При низьких збільшеннях та великим полем зору він часто застосовується більш досвідченими астрономами аматорами для спостереження за туманностями та кометами. Якість зображення по краях починає помітно погіршуватися при зростанні збільшення. Для окулярів цього типу дуже важливе якісне та багатошарове просвітлення, оскільки велика кількість лінз в окулярі збільшує втрати світла та збільшує ймовірність виникнення відблисків [1, 4].



Рисунок 1.4 – Приклад оптичної схеми окуляра Ерфле [6]

1.4.4 Ширококутний окуляр

Ширококутні окуляри або UWA – Ultra Wide Angle (Ультра Широкий Кут). Іноді також зустрічається назва Scidmore на честь винахідника схеми. Такі окуляри дають ще більше поле зору (досягаючи 85° та навіть 100°). Є багато різноманітних видів, які відрізняються в залежності від виробника, та мають від 6–ти до 9–то до 10–ти лінз у своїй конструкції. Через велику кількість оптичних поверхонь в даних окулярах виникають значні втрати світла. Зазвичай, зображення досить серйозно програє в яскравості, більше, ніж при використанні інших типів окулярів. Але, з іншого боку, ці окуляри дають дуже якісне та сильно виправлене від багатьох аберацій зображення. Моделі від найзнаменитіших брендів, такий як TeleVue, наприклад, мають насправді чудове зображення та не просто так завоювали абсолютну повагу серед західних аматорів астрономії. Але, водночас, подібні окуляри є найдорожчими. Деякі представники найбільш досконалих схем з кутом поля зору близько 100° та чудово виправленим полем можуть по своїй ціні досягати вартості вже доволі непоганого телескопа [4].

Нижче представлені сучасні моделі ширококутних окулярів компаній Tele Vue Optics, Celestron та Explore Scientific.



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд окуляра Tele Vue Nagler Type–4 17mm Eyepiece (2")
[7]

Таблиця 1.1

Конструкційні параметри окуляра Tele Vue Nagler Type–4 17mm Eyepiece (2")

Параметр	Значення
Фокусна відстань	17 мм
Видиме поле зору	82°
Віддалення зіниці	17 мм
Діаметр польової діафрагми	24,3 мм
Діаметр корпусу	2"
Габарити	6,6 х 6,1 см
Вага	725,75 г

Натхнений відомою конструкцією Nagler, модель Tele Vue Nagler Type–4 17mm використовує конфігурацію з семи елементів у п'яти групах. Це дозволяє зберегти контрастність та чіткість оригінальної конструкції, при цьому окуляр оптимізований для спостереження глибокого космосу [7].

Створений відповідно до жорстких стандартів Tele Vue, окуляр Type–4 оснащений оптикою з повністю антивідблисковим багат шаровим покриттям для покращення яскравості, кольоропередачі та контрастності. Запатентований наочник Instadjust забезпечує правильну відстань між оком спостерігача та лінзою, і, в той же час, блокує заважаюче розсіяне периферійне світло не відволікаючи від спостереження

тих, хто носить окуляри. Не дивлячись на помірну фокусну відстань, оптичні властивості дозволяють йому підтримувати видиме поле зору шириною в 82° та великим віддаленням зіниці 17 мм, що забезпечує достатній простір для запобігання випадкового контакту, який може заважати спостереженню. Ця модель має великий діаметр корпусу – 2 дюйма, що робить спостереження ще більш комфортним, та текстуровану гумову рукоятку для впевненого використання [7].



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд окуляра Tele Vue Nagler Type–5 31mm Eyepiece (2")
[8]

Таблиця 1.2

Конструкційні параметри окуляра Tele Vue Nagler Type–5 31mm Eyepiece (2")

Параметр	Значення
Фокусна відстань	31 мм
Видиме поле зору	82°
Віддалення зіниці	19 мм
Діаметр польової діафрагми	42 мм
Діаметр корпусу	2"
Габарити	8,4 x 9,9 см
Вага	997,9 г

В окулярі Tele Vue Naglar Type–5 31mm використовується незвичайна, для цієї серії, конфігурація лінз з шести елементами у чотирьох групах для забезпечення різкого контрасту, необхідного користувачу, при збереженні характерного для серії

широкого видимого кута зору. Користувачі також відмічають практично нульове вторинне затемнення [8].

Як і попередня модель, даний окуляр створений відповідно до жорстких стандартів Tele Vue, та має ті ж самі сильні сторони та корисні властивості, а саме:

- багатошарове антивідблискове покриття;
- зручний функціональний наочник;
- зручна текстурована гумова рукоятка.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд окуляра Tele Vue Nagler Type–6 13mm Eyepiece (1.25") [9]

Таблиця 1.3

Конструкційні параметри окуляра Tele Vue Nagler Type–6 13mm Eyepiece (1.25")

Параметр	Значення
Фокусна відстань	13 мм
Видиме поле зору	82°
Віддалення зіниці	12 мм
Діаметр польової діафрагми	17,6 мм
Діаметр корпусу	1,25"
Габарити	4,1 x 7,4 см
Вага	181,4 г

Заснована на оригінальній конструкції Nagler та досвіду більш нових моделей, конфігурація окуляра Tele Vue Nagler Type–6 13mm складається з семи елементів у

чотирьох групах. Цей окуляр був спроектований, як найкращий для спостереження за Місяцем та планетами [9].

Незважаючи на середню фокусну відстань, оптичні властивості цього окуляра дозволяють підтримувати широке видиме поле зору 82° та зручне віддалення зіниці 12 мм, яке забезпечує достатню відстань між оптичним елементом та оком спостерігача. Зроблений відповідно до жорстких стандартів Модель Tele Vue, Type–6 має всі переваги та зручні властивості попередніх моделей [9]:

- багат шарове антивідблискове покриття;
- зручний функціональний наочник з можливістю відкидання;
- зручна текстурована гумова рукоятка.

Крім цього, Type–6 має менший діаметр корпусу, що дозволяє використовувати його зі сторонніми фокусуєчими приладами та аксесуарами найпоширеніших розмірів [9].



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд окуляра Explore Scientific 82° Series 30mm Eyepiece (2") [10]

Таблиця 1.4

Конструкційні параметри окуляра Explore Scientific 82° Series 30mm Eyepiece (2")

Параметр	Значення
Фокусна відстань	30 мм
Видиме поле зору	82°
Віддалення зіниці	22 мм
Діаметр польової діафрагми	43 мм
Діаметр корпусу	2"
Габарити	8,2 x 13,1 см
Вага	1 кг

Окуляр Explore Scientific 82° Series 30mm Eyepiece (2") забезпечує широке видиме поле зору 82° з великим віддаленням зіниці 22 мм, що дозволяє користувачу зручно користуватися окуляром під час тривалого спостереження. Крім цього, велике віддалення зіниці також надає можливість використовувати методи бокового спостереження, які дозволяють бачити слабкі деталі невловимих об'єктів, таких як тонкі туманності. Запатентоване антивідблискове багат шарове покриття EMD забезпечує яскраве, висококонтрастне зображення з істинною передачею кольорів по всьому широкому полі зору. Для мінімізації внутрішнього відбиття та покращення контрастності, внутрішня сторона оправы затемнена, як і краї лінз, щоб мінімізувати розсіювання світла всередині самих лінз. Відкритий гумовий наочник запобігає проникненню розсіяного світла в око та забезпечує зручність використання для тих, хто носить окуляри. Рукоятка має текстуровану поверхню для надійного зчеплення під час заміни. Крім цього окуляр наповнений аргоном для захисту від води та запотівання під час використання в екстремальних температурах і кліматичних умовах [10, 11].



Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд окуляра Explore Scientific 82° Series 14mm Eyepiece (1.25") [12]

Використовуючи покращений комп'ютерний дизайн, поєднання оптичного скла з низькою дисперсією та високим показником заломлення, Explore Scientific 82° Series 14mm Eyepiece (1.25") оптимізований для забезпечення високої контрастності, високої роздільної здатності та гарних характеристик плоского поля. Дана модель може застосовуватися в тих випадках, коли потрібна більша потужність, наприклад для спостереження за шаровими зірковими скупченнями, за хмарною структурою поблизу ядер комет або, з належною безпечною фільтрацією на телескопі, за активними об'єктами Сонця [12, 13].

Як і окуляр Explore Scientific 30mm, модель Explore Scientific 14mm має ті ж самі переваги та корисні властивості [12, 13]:

- запатентоване багатошарове антивідблискове покриття EMD;
- затемнена внутрішня сторона оправы та затемнені краї лінз;
- зручний відкритий гумовий наочник;
- зручна текстурована гумова рукоятка;
- аргонне наповнення для захисту від води та запотівання.



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд окуляра Explore Scientific 82° Series 8.5mm Eyepiece (1.25") [14]

Таблиця 1.6

Конструкційні параметри окуляра Explore Scientific 82° Series 8.5mm Eyepiece (1.25")

Параметр	Значення
Фокусна відстань	8,5 мм
Видиме поле зору	82°
Віддалення зіниці	15 мм
Діаметр польової діафрагми	30,5 мм
Діаметр корпусу	1,25"
Параметр	Значення
Габарити	5 x 10,6 см
Вага	280 г

Модель Explore Scientific 82° Series 8.5mm Eyepiece (1.25") має досить малу фокусну відстань 8,5 мм забезпечує велике збільшення, яке добре підходить для спостереження за такими об'єктами, як Місяць, планети та подвійні зірки. А коли атмосферні умови наближені до ідеальних, окуляр дозволяє ретельно визначити структури всередині об'єктів глибокого космосу. Загалом цей багатoelementний окуляр забезпечує чудове світлопропускання завдяки оптиці з низькодисперсного скла з високим коефіцієнтом заломлення та спеціальним покриттям. Поєднання цих

факторів максимізує потенціал телескопа і значно підвищує контрастність та чіткість [14, 15].

Звісно, як і попередні моделі, окуляр Explore Scientific 8.5mm також має всі ті переваги та зручні властивості [14, 15]:

- запатентоване багатошарове антивідблискове покриття EMD;
- затемнена внутрішня сторона оправы та затемнені краї лінз;
- зручний відкритий гумовий наочник;
- зручна текстурована гумова рукоятка;
- аргонне наповнення для захисту від води та запотівання.



Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд окуляра Celestron Luminos 15mm Eyepiece (1.25") [16]

Таблиця 1.7

Конструкційні параметри окуляра Celestron Luminos 15mm Eyepiece (1.25")

Параметр	Значення
Фокусна відстань	15 мм
Видиме поле зору	82°
Віддалення зіниці	17 мм
Діаметр польової діафрагми	26 мм
Діаметр корпусу	1,25"
Габарити	-

Вага	340,19 г
------	----------

Окуляр Celestron Luminos 15mm Eyepiece (1.25") складається з семи лінз, забезпечує поле зору 82° та має середню фокусну відстань 17 мм. Даний окуляр є парафокальним, що дозволяє замінювати його іншими окулярами Luminos без необхідності регулювання фокусу, що дає можливість проводити більше часу за спостереженням, зменшуючи вірогідність того, що приціл буде зміщений. Усі компоненти окуляра мають багат шарове просвітлююче покриття для покращення яскравості та контрастності зображення. Виготовлений з легкого та міцного алюмінієвого сплаву з анодованим покриттям, корпус цієї моделі оснащений різьбою для встановлення окулярних фільтрів, має стійку до ковзання гумову рукоятку та інноваційний висувний наочник [16, 17].



Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд окуляра Celestron Luminos 23mm Eyepiece (2") [18]

Таблиця 1.8

Конструкційні параметри окуляра Celestron Luminos 23mm Eyepiece (2")

Параметр	Значення
Фокусна відстань	23 мм
Видиме поле зору	82°
Віддалення зіниці	20 мм
Діаметр польової діафрагми	37 мм
Діаметр корпусу	2"

Габарити	-
Вага	479,1 г

Як і модель Celestron Luminos 15mm, окуляр Celestron Luminos 23mm забезпечує поле зору 82° , але має більшу фокусну відстань 23 мм. Даний окуляр складається з шести елементів, кожен з яких має спеціальне покриття для покращення контрастності та чіткості зображення [18, 19].

Окуляр Celestron Luminos 23mm має всі переваги та корисні властивості, що й попередня модель [18, 19]:

- окуляр є парафокальним;
- багатошарове просвітлююче покриття;
- корпус має різьбу для встановлення фільтрів;
- стійка до ковзання гумова рукоятка;
- зручний висувний гумовий наочник.



Рисунок 1.13 – Зовнішній вигляд окуляра Celestron Luminos 31mm Eyepiece (2") [20]

Таблиця 1.9

Конструкційні параметри окуляра Celestron Luminos 31mm Eyepiece (2")

Параметр	Значення
Фокусна відстань	31 мм
Видиме поле зору	82°
Віддалення зіниці	27 мм
Діаметр польової діафрагми	47 мм

Діаметр корпусу	2"
Габарити	-
Вага	1,2 кг

Окуляр Celestron Luminos 31mm забезпечує полу зору 82° та найбільшу серед окулярів серії Luminos фокусну відстань 31 мм. Його конструкція складається з шести елементів [20, 21].

Дана модель оснащена усіма перевагами та зручними властивостями, які характерні для серії Luminos, а саме [20, 21]:

- окуляр є парафокальним;
- багат шарове просвітлююче покриття;
- корпус має різьбу для встановлення фільтрів;
- стійка до ковзання гумова рукоятка;
- зручний висувний гумовий наочник.

1.5 Висновки до першого розділу

В результаті огляду літератури було встановлено, що ширококутні окуляри найчастіше використовуються у мікроскопії та астрономії, оскільки забезпечують широкий кут поля зору та дозволяють спостерігачу бачити значно більше деталей без зміщення приладу. Крім цього, було встановлено, що типовий ширококутний окуляр, зазвичай, складається з шести або семи лінз у чотирьох або п'яти групах, забезпечує кут поля зору 82° і більше. Фокусна відстань ширококутного окуляра може знаходитися у діапазоні від 3,5 мм до 31 мм, в залежності від моделі та потреб користувача. Габарити та вага таких окулярів теж варіюються в залежності від характеристик різних моделей, в діапазоні від 250 г до 1,2 кг.

Головною перевагою ширококутних окулярів їх широке поле зору, що дозволяє користувачу бачити значно більше деталей без потреби зміщувати прилад, що може призвести до дефокусування.

РОЗДІЛ 2 ЗАПРОПОНОВАНИЙ ПІДХІД РОЗРАХУНКУ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Даний розділ присвячений розгляду та аналізу сучасних методів глобальної та локальної оптимізації. Його мета полягає у виборі певного методу оптимізації, який буде застосовуватися далі, під час параметричного синтезу оптичної системи окуляра [22].

2.1 Методи локальної оптимізації

На сьогоднішній день у багатьох сферах людської діяльності (у економіці, логістиці, техніці, програмуванні, науці, виробництві тощо) зустрічається проблема вибору серед декількох можливих варіантів поведінки оптимального або найкращого варіанту. Завдання такого типу називаються завданнями оптимізації. Основою оптимізаційних завдань є пошук мінімуму або максимуму деяких величин [22, 23].

Локальний пошук (або локальна оптимізація) – це пошук, який здійснюється алгоритмами локального пошуку, групою алгоритмів, у яких пошук ведеться лише на підставі поточного стану, без урахування та запам'ятовування раніше пройдених станів [22, 24].

Знаходження найкращого рішень досягається за допомогою багаторазового використання методів локальної оптимізації. Ці методи можуть застосовуватися для завдань, які постають у вигляді знаходження деякого розв'язку, максимального, за певною характеристикою, серед можливих існуючих рішень. Алгоритми локальної оптимізації перебирають усі можливі розв'язки за допомогою здійснення деяких локальних змін, до тих пір, поки результат не буде зведений до оптимального або не буде вичерпано певний ліміт кількості спроб або часу [22, 25].

Сучасна схема класифікації методів локальної оптимізації наведена на рис. 2.1.

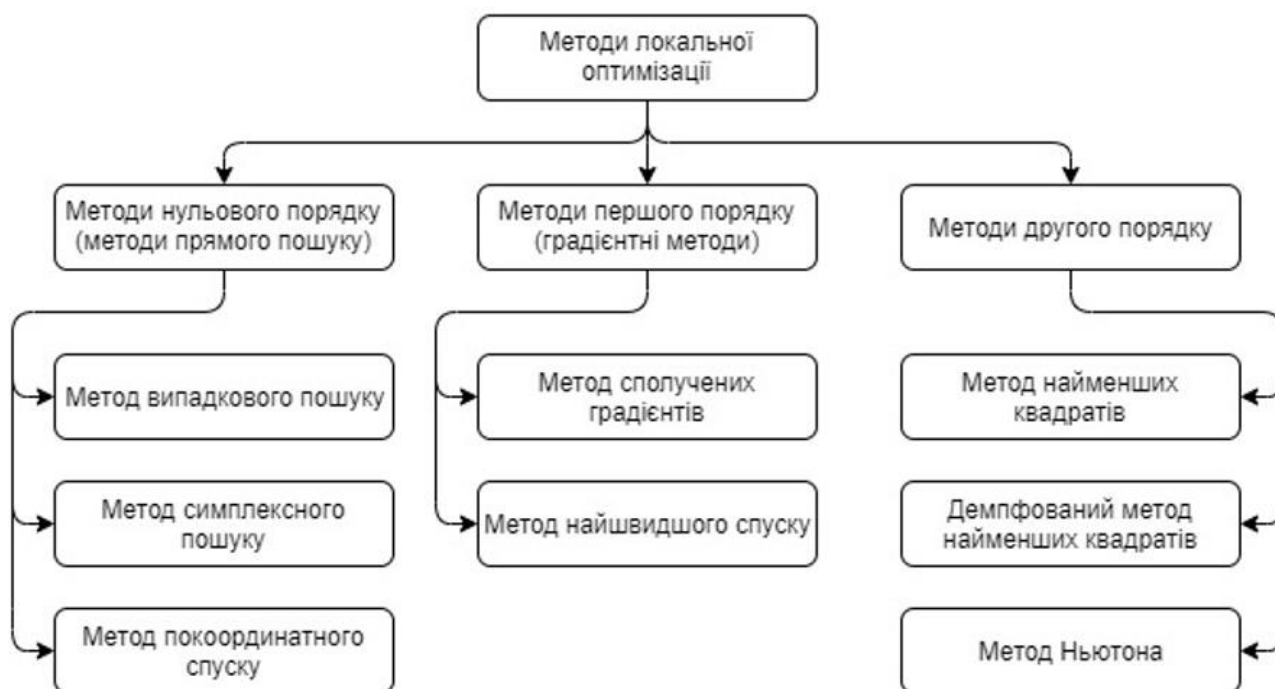


Рисунок 2.1 – Сучасна схема класифікації методів локальної оптимізації

Загалом, всі методи локальної оптимізації можна розподілити на такі три групи:

- 1) Методи локальної оптимізації нульового порядку (методи прямого пошуку);
- 2) Методи локальної оптимізації першого порядку (градієнтні методи);
- 3) Методи локальної оптимізації другого порядку.

2.1.1 Методи нульового порядку

Методами нульового порядку (або прямими методами) називають методи, що побудовані на основі емпірично отриманих даних та влучних пропозицій, і при цьому, не мати у своїй основі певного математичного обґрунтування [22, 24].

Методи прямого пошуку не вважаються найефективнішими серед інших. Це спричинено відсутністю перших та других похідних оцінної функції, що не дозволяє значно збільшити швидкість збіжності. До переваг методів прямого пошуку можна віднести можливість розв'язання таких завдань оптимізації, коли розрахунок градієнта та матриці Гессе досить ускладнений або коли оцінна функція

недиференційована. А на практиці, особливо часто зустрічаються саме такі випадки [22, 26].

До методів локальної оптимізації нульового порядку можна віднести наступні методи:

- метод випадкового пошуку;
- метод симплексного пошуку;
- метод покоординатного спуску.

Метод випадкового пошуку заснований на застосуванні послідовностей випадкових чисел, за допомогою яких в області зміни незалежних змінних проводиться вибірка визначених випадкових напрямків або випадкових точок [27].

Спочатку задається початкова точка x_0 . Кожна наступна точка визначається за допомогою формули [27]:

$$x_{k+1} = x_k + t_k \cdot \xi_k \quad (2.1)$$

де $t_k > 0$ – величина кроку; ξ_k – випадковий вектор одиничної довжини, який визначає напрямок пошуку; k – номер ітерації. На поточній ітерації, за допомогою генерації випадкових векторів ξ_k отримується точки, які лежать на гіперсфері з радіусом t_k з центром у точці x_k (рис. 2.2) [27].

Потім, якщо значення функції у отриманій точці не менше, ніж в центрі, крок рахується невдалим та робиться повернення до поточного центру, після чого пошук продовжується. Якщо число невдалих кроків з поточної точки досягає деякого числа M , то подальший пошук продовжується з тієї ж самої точки, але з меншим кроком до тих пір, поки він не стане меншим ніж раніше задана величина R . Якщо ж значення функції в отриманій точці менше, ніж в центрі, то крок вважається вдалим і центральна точка переноситься у нову точку, а подальший пошук продовжується з цієї точки [27].

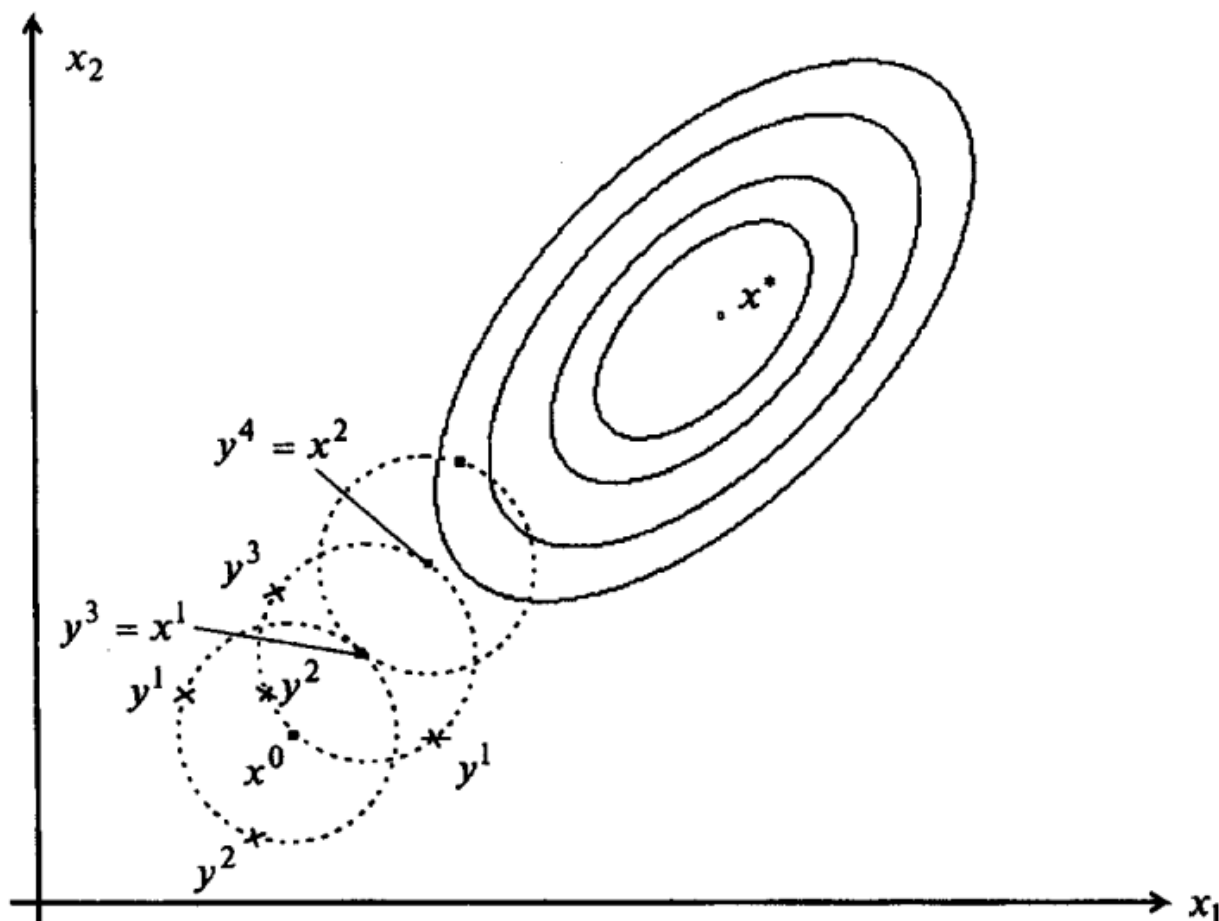


Рисунок 2.2 – Графічний приклад реалізації алгоритму методу випадкового пошуку [27]

У даного методу можна виділити дві основні переваги [27]:

- метод можна використовувати для будь-якої цільової функції незалежно від того, є вона унімодальна чи ні;
- вірогідність успіху під час спроб не залежить від розмірності простору, що розглядається.

Недоліком методу можна вважати то, що потрібно заздалегідь задавати область, у якій будуть обиратися випадкові точки [27].

Метод симплексного пошуку реалізує процедуру прямого пошуку оптимуму на основі розрахунку цільової функції та за допомогою геометричних представлень [28].

Процедура симплексного пошуку базується на тому, що правильний (регулярний) симплекс є експериментальним зразком, який містить щонайменше точок. Правильний симплекс у n -мірному просторі представляє з себе багатогранник, що утворений $n+1$ рівновіддаленими одна від одної точками (вершинами). Наприклад, у двовимірному просторі симплексом буде рівносторонній трикутник, а у тривимірному – чотиригранна піраміда [28].

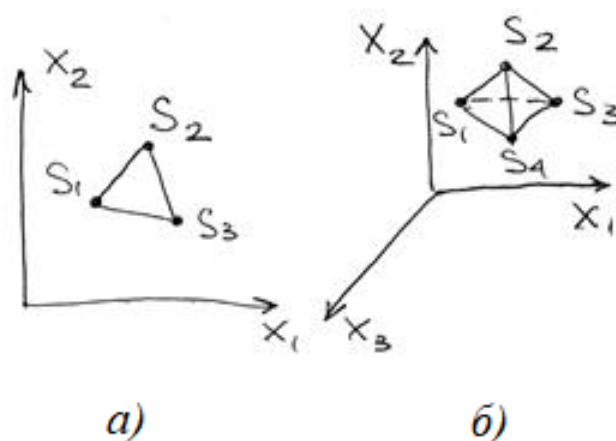


Рисунок 2.3 – Приклади симплекса на площині та в просторі: а) двовимірний простір; б) тривимірний простір [28]

В алгоритмі симплексного пошуку також використовується важлива властивість симплексів: навпроти будь-якої з вершин симплекса S_j розташована лише одна грань, на якій можна побудувати новий симплекс шляхом перенесення обраної вершини на деяку відповідну відстань уздовж прямої, яка проведена через центр ваги інших вершин початкового симплекса. Точка, що отримана таким способом, буде вершиною нового симплекса, а обрана під час побудови вершина початкового симплекса відкидається [28].

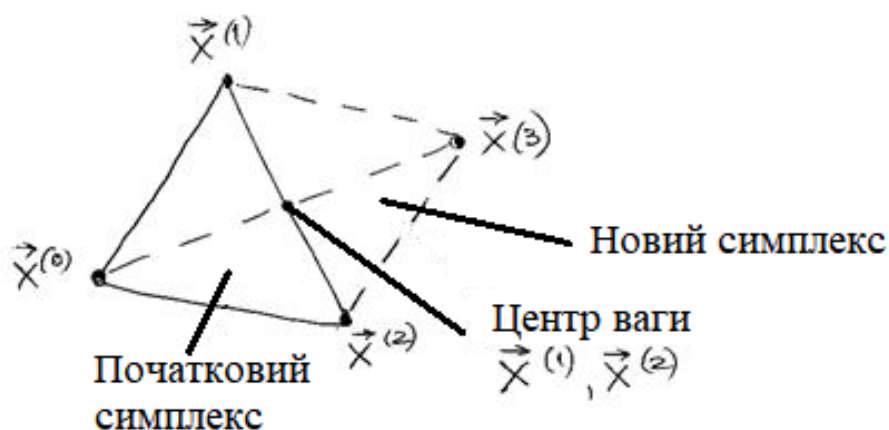


Рисунок 2.4 – Приклад побудови нового симплекса на площині [28]

Алгоритм роботи цього методу можна описати наступною послідовністю дій. Спочатку обирається початковий симплекс $S_{10}S_{20}S_{30}$ та визначається значення $I(\bar{x})$ у точках вершини. Після отримання значень $I(\bar{x})$ обирається найгірша вершина, у якій значення $I(\bar{x})$ найбільше (вершина S_{10}). Потім будується новий симплекс, для чого найгірша вершина замінюється новою S_{11} , яка розміщується симетрично відносно центра грані, яка знаходиться навпроти неї. У новій вершини розраховується значення $I(\bar{x})$, яке порівнюється з відомим значенням для двох інших вершин S_{20} та S_{30} нового симплекса. Далі знову визначається найгірша вершина (S_{30}), яка відкидається аналогічним чином і так далі [28].

У результаті повтору процедури відкидання найгіршої вершини, процес пошуку зводиться до оптимального значення $I(\bar{x})$. У районі оптимуму може виникнути циклічний рух по двох або більше симплексам, коли нова отримана вершина виявиться найгіршою та її буде відкинуто до попереднього симплекса. На рис. 2.5. (а) відкидання найгіршої вершини S_{34} приводить до попередньої вершини S_{33} , що призводить до зациклювання алгоритму пошуку [28].

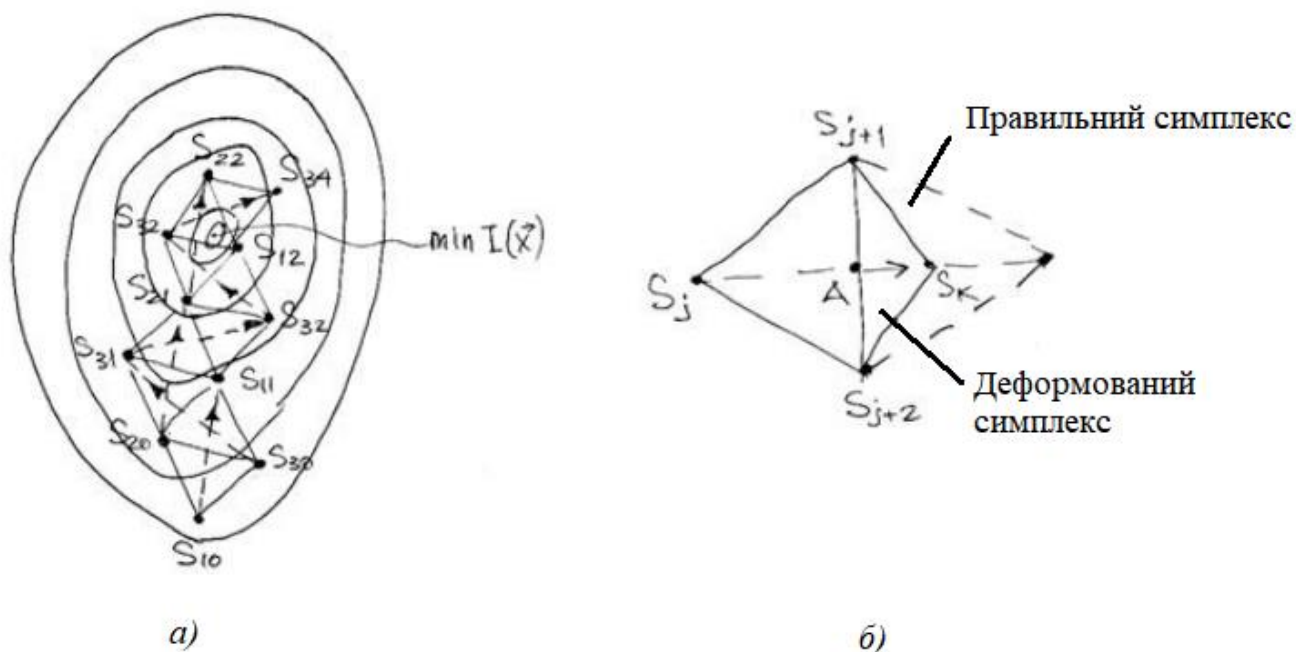


Рисунок 2.5 – а) Приклад знаходження оптимуму методом симплексного пошуку; б) приклад побудови деформованого симплекса [28].

У таких випадках можна скористатися наступними правилами:

1) Якщо вершина, якій відповідає найбільше значення $I(\bar{x})$, побудована на попередній ітерації, то необхідно зменшити розміри симплекса за допомогою коефіцієнта редукції та побудувати новий правильний симплекс, обравши при цьому у якості базової точку, якій відповідає найкраще (мінімальне) значення $I(\bar{x})$ [28].

2) Побудувати деформований симплекс, для чого відкидаємо вершина S_j переноситься на відстань $0,5 \cdot S_j$. При цьому, відбувається стиснення симплекса

Однак, цей метод не завжди може гарантувати розв'язок задачі. Крім того, недоліком можна вважати потребу у великій кількості ітерацій [28].

Метод покоординатного спуску одним з найпростіших методів локальної оптимізації та досить добре працює з функцією, у якої відносно «гладкий рельєф». Спочатку береться деяка точка, з неї робиться крок, паралельно до однієї з координат осі, та обчислюється значення цільової функції. Зі зменшенням цільової функції рух продовжується у тому ж напрямі. У випадку, коли значення цільової функції збільшується, робиться повернення до попередньої точки, а потім крок в іншому

напрямку. Таку процедуру слід робити до тих пір, поки не буде знайдено оптимальну точку [22, 29].

До недоліків методу можна віднести те, що його не можна застосовувати, коли у лініях рівня є злами [22, 29].

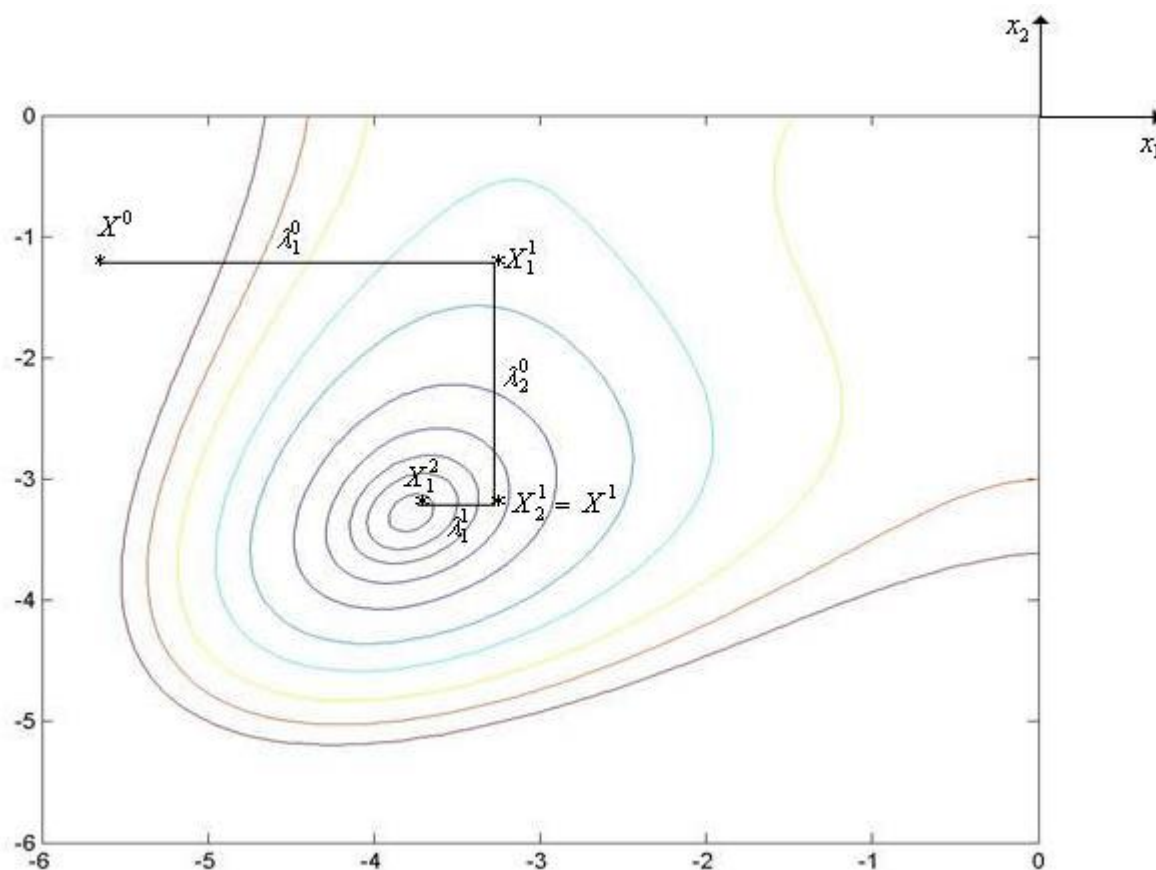


Рисунок 2.6 – Приклад траєкторії руху, при застосуванні методу покоординатного спуску [30]

2.1.2 Методи першого порядку

Методи першого порядку засновані на використанні вектору-градієнта, тому їх також називають градієнтними методами. Вектор-градієнт – це вектор, що направлений в сторону найшвидшого зростання функції в даній точці. Вектор, протилежний градієнту, називається антиградієнтом та направлений в сторону

найшвидшого спадання функції. Такі методи часто застосовуються для виконання завдань з великою кількістю обчислень [31].

До методів локальної оптимізації першого порядку належать наступні методи:

- метод сполучених градієнтів;
- метод найшвидшого спуску.

Метод сполучених (пов'язаних) градієнтів формує напрямки пошуку, які в більшій мірі відповідає геометрії функції, що мінімізується. Це суттєво збільшує швидкість їх збіжності та дозволяє мінімізувати квадратичну функцію з симетричною додатно визначеною матрицею H за кінцеве число кроків n , яке дорівнює числу змінних функції. Будь-яка гладка функція поруч з точкою мінімуму добре апроксимується квадратичною, тому методи сполучених градієнтів успішно використовуються для мінімізації та неквадратичних функцій. В такому випадку вони перестають бути кінцевими та стають ітеративними [31].

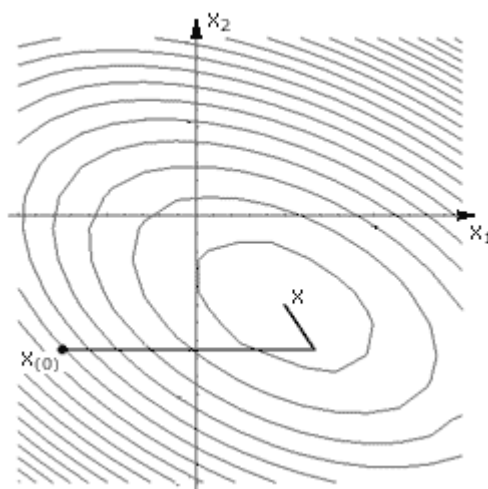


Рисунок 2.7 – Приклад траєкторії руху в точку мінімуму, при застосуванні методу сполучених градієнтів [32]

При використанні **методу найшвидшого спуску** на кожній ітерації величина кроку a_k обирається з умови мінімуму функції $f(x)$ у напрямку спуску, тобто [31]:

$$f(x[k] - a_k \cdot \nabla f(x[k])) = \min_{a>0} f(x[k] - a \cdot \nabla f(x[k])) \quad (2.2)$$

Ця умова означає, що рух уздовж антиградієнту відбувається до тих пір, поки значення функції $f(x)$ спадає.

Алгоритм методу найшвидшого спуску полягає в наступному [31]:

- 1) Задаються координати початкової точки $x[0]$;
- 2) У точці $x[k], k = 0, 1, 2, \dots$ розраховується значення градієнта $f(x[k])$;
- 3) Визначається величина кроку a_k , шляхом одновірної мінімізації по a функції:

$$\varphi(a) = f(x[k] - a \cdot f(x[k])) \quad (2.3)$$

- 4) Визначаються координати точки $x_i[k + 1]$:

$$x_i[k + 1] = x_i[k] - a_k \cdot f_i(x[k]), i = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

- 5) Перевіряються умови зупинки ітераційного процесу. Якщо вони виконуються, то обчислення припиняються. В іншому випадку здійснюється перехід до першого пункту.

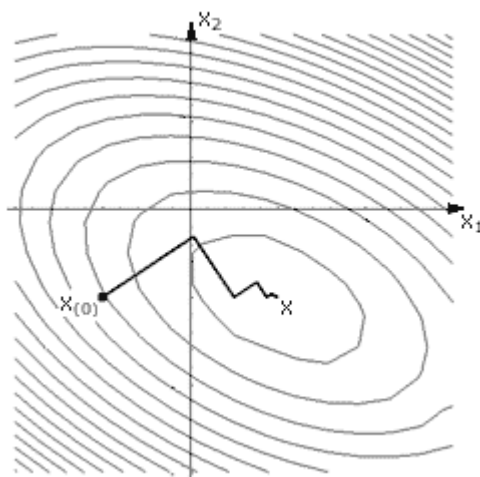


Рисунок 2.8 – Приклад траєкторії руху в точку мінімуму, при застосуванні найшвидшого спуску [32].

Головним недоліком цього методу є низька швидкість збіжності біля екстремуму. Через це його рідко використовують як самостійну оптимізуючу процедуру [22, 33].

2.1.3 Методи другого порядку

Методи другого порядку застосовуються на тому етапі, коли пошукові точки знаходяться поблизу точки мінімуму, а методи нульового та першого порядків втрачають свою ефективність. Ці методи оптимізації використовують другі часткові похідні функції, що мінімізується, мають вищу швидкість збіжності та дозволяють враховувати структуру цільової функції [22, 34].

До методів локальної оптимізації другого порядку відносяться наступні методи:

- метод Ньютона;
- метод найменших квадратів;
- демпфований метод найменших квадратів.

У **методі Ньютона**, при пошуку екстремуму цільової функції використовується її перша та друга похідні. Метод може застосовуватися для увігнутої (або опуклої), функції $F(x)$, що відповідає монотонності її першої похідної $f(x)$ [31].

Відомо, що у випадку, коли функція $F(x)$ має локальний мінімум (або максимум) у точці $\bar{x}$, то у цій точці градієнт функції $F(x)$ (вектор її похідних) дорівнює нулю, тобто:

$$F'(x) = f(x) = 0 \quad (2.5)$$

Відповідно, якщо функція $F(x)$ диференційована, то для знаходження її екстремуму потрібно буде вирішити рівняння:

$$f(x) = 0 \quad (2.6)$$

де $f(x) = F'(x)$. $\bar{x}$ – корінь рівняння.

Алгоритм методу Ньютона зводиться до лінійного представлення функції $f(x)$ та вирішенню рівняння (2.7).

Спочатку функція $f(x)$ розкладається в ряд Тейлора [31]:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + h_i \cdot f'(x_i) + \frac{h_i^2}{2!} \cdot f''(x_i) + \frac{h_i^3}{3!} \cdot f'''(x_i) + \dots \quad (2.7)$$

де $h_i = x_{i+1} - x_i$.

Відкидаємо члени ряду, які містять $h_i^2, h_i^3, \dots$, після чого отримаємо:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + (x_{i+1} - x_i) \cdot f'(x_i) \quad (2.8)$$

Якщо у точці (x_{i+1}) досягається екстремум функції $F(x)$, то $f(x_{i+1}) = 0$ та формула (2.8).

Отже, точка екстремуму буде дорівнювати:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} = x_i - \frac{F'(x_i)}{F''(x_i)} \quad (2.9)$$

Для знаходження екстремуму функції $F(x)$ необхідно на кожному кроці ітераційного процесу пошуку визначити першу та другу похідні цільової функції. Початкові наближення x обирається у тій точці інтервалу $[a, b]$, де знаки функції $f(x)$ та її кривизни $f''(x)$ співпадають, тобто виконується рівність:

$$f(x) \cdot f''(x) > 0, \quad (2.10)$$

де $f''(x) = F'''(x) = F3$.

Загалом, алгоритм можна звести до такої послідовності дій [31]:

- 1) Обирається початкову точку x . Якщо $F'(a) \cdot F'''(a) > 0$, то $x = a$, в іншому випадку $x = b$;
- 2) Знаходиться наближення кореня (x_{i+1}) по виразу (2.9);

3) Ітераційний процес продовжується до тих пір, поки $|x_{i+1} - x_i| < \varepsilon$.

Метод Ньютона може розходитися, якщо початкове наближення знаходиться далеко від точки мінімуму. Збіжність цього методу можна гарантувати лише в тих випадках, коли початкове наближення знаходиться на досить малій відстані від точок мінімуму та матриця Гессе додатно визначена. Тому на практиці метод Ньютона зазвичай використовується у поєднанні з одним із інших методів [22, 34].

Метод найменших квадратів базується на оцінці закономірностей, які спостерігаються на тлі випадкових коливань та використанні подальших розрахунків [22, 35].

Траєкторія руху у цьому методі визначається з рішення, так званої, нормальної системи, отриманої прирівнюванням нуля градієнту G_i лінійної моделі [36].

$$G_L = N + M\Delta X = 0 \text{ або } M\Delta X = -N \quad (2.11)$$

Рішення цієї системи $\Delta X = -M^{-1}N$ визначає точку, у якій градієнт G_L дорівнює нулю, тобто точку мінімуму для лінійної моделі. Помноживши це рішення на безрозмірну довжину кроку ρ можна отримати траєкторію руху $\Delta X(\rho)$ у вигляді прямої лінії, яка при $\rho = 1$ проходить через мінімум лінійної моделі [36].

$$\Delta X(\rho) = -\rho M^{-1}N = -\rho(A^T A)^{-1} A^T F_0 \quad (2.12)$$

Недоліком цього методу можна назвати те, що знайдена точка мінімуму часто виходить в області лінійності [22, 37].

Демпфований метод найменших квадратів є вдосконаленням попереднього методу. Його ідея полягає в обмеженні довжини вектору розв'язку, в результаті чого покращується збіжність. Це досягається за рахунок додавання до оцінної функції φ зваженої суми квадратів відхилень параметрів від їх значень у початковій точці, тобто квадрата довжини вектору [22, 36]:

$$\varphi_p = \varphi + p^2 |\Delta X|^2 = \varphi + p^2 \Delta X^T \Delta X = F^T F + p^2 \Delta X^T \Delta X \quad (2.13)$$

де φ_p – нова оцінна функція; p^2 – ваговий коефіцієнт, демпфер.

В процесі оптимізації шукається вже не мінімум φ , а мінімум φ_p , тобто до умови мінімуму квадрату довжини вектору функції приєднується вимога мінімізації квадрата довжини відхилення ΔX від початкової точки у просторі параметрів. Після цього визначається точка, в якій демпфована оцінна функція φ_{pL} лінійної моделі має мінімум [36]:

$$\begin{aligned} \varphi_{pL} &= \varphi_L + p^2 \Delta X^T \Delta X = \varphi_0 + \Delta X^T N + \Delta X^T M \Delta X + p^2 \Delta X^T \Delta X = \\ &= \varphi_0 + \Delta X^T N + \Delta X^T (M + p^2 I) \Delta X \end{aligned} \quad (2.14)$$

Для цього знаходиться градієнт G_{pL} цієї оцінної функції та прирівнюється до нуля:

$$G_{pL} = N + (M + p^2 I) \Delta X = 0 \quad (2.15)$$

Або $M_p \Delta X = -N$, де $M_p = M + p^2 I$.

У результаті отримується, так звана, демпфована нормальна система рівнянь відносно ΔX , матриця M_p яка відрізняється від матриці M нормальної системи у стандартному методі нормальних квадратів тим, що до неї додається помножена на демпфер p^2 одинична матриця або тим, що діагональні елементи матриці M збільшені на p^2 [36].

Перевагою демпфованого методу найменших квадратів можна назвати те, що при будь-якому, відмінному від нуля, демпфері рішення по формулі (2.15) завжди буде звичайним, не залежно від співвідношення кількості параметрів і функцій та наявності серед параметрів слабковпливаючих або лінійно пов'язаних [22, 37].

2.1.4 Висновки до методів локальної оптимізації

У результаті проведеного аналізу встановлено, що методи локальної оптимізації дозволяють швидко покращити параметри та характеристики системи. Найдосконаліші з них використовують похідні другого порядку, зокрема матрицю Якобі $\bar{A}$ та матрицю Гессе $\bar{H}$. Ці методи призводять до якісного результату, як правило, лише тоді, коли початкова система є близькою або наближеною до оптимальної.

2.2 Методи глобальної оптимізації

Великий обсяг даних потребує спеціальних методів аналізу, що, з використанням традиційних статистичних методів, далеко не завжди вдається зробити. При цьому, за допомогою застосування методів інтелектуального аналізу вдається досягти деяких конкретних результатів [38].

На даний момент часу існує майже безліч різноманітних методів оптимізації, які знаходять застосування у багатьох сферах людської діяльності. При цьому часто з'являється необхідність обрати найкраще рішення з безлічі можливих, за певними критеріями, для вирішення конкретних практичних завдань [38].

Суттєвим недоліком методів локальної оптимізації є те, що вони «застопорюються» на першому знайденому ними мінімумі. Глобальна оптимізація, навпроти, робить можливим отримання рішення, яке, на всьому просторі допустимих значень параметрів системи, буде мати найменше значення цільової функції [22, 39, 40].

Сучасна схема класифікації методів глобальної оптимізації наведена на рис. 2.9 [38].

Головними перевагами цих методів вважаються [22, 39]:

- в рамках відомих, на сьогоднішній день, схем випадкового пошуку досить легко будуються нові алгоритми, які реалізують різні евристичні процедури адаптації
- порівняно мала чутливість до зростання розмірності безлічі оптимізації;

- досить мала чутливість до нерегулярної поведінки цільової функції та наявності випадкових помилок при обчисленні функції;
- значно вища швидкодія;
- наявність можливості природного введення в процес пошуку операції навчання та самонавчання;
- порівняно проста внутрішня реалізація;
- високі стійкість та надійність.

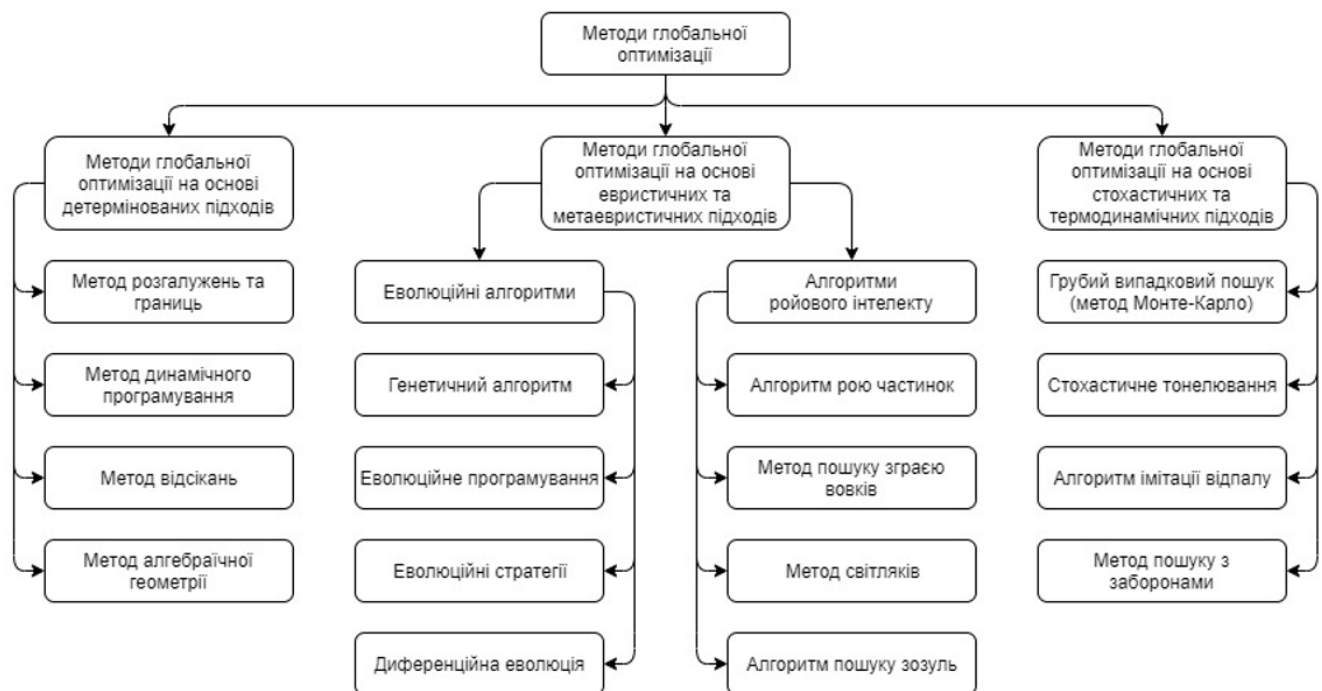


Рисунок 2.9 – Сучасна схема класифікації методів глобальної оптимізації [38]

Загалом, всі методи глобальної оптимізації можна розподілити на такі три групи [38]:

- 1) Методи глобальної оптимізації на основі детермінованих підходів;
- 2) Методи глобальної оптимізації на основі евристичних та метаевристичних підходів;
- 3) Методи глобальної оптимізації на основі стохастичних та термодинамічних підходів.

2.2.1 Методи глобальної оптимізації на основі детермінованих підходів

Методи глобальної оптимізації на основі детермінованих підходів, або детерміновані методи, знаходять глобальне рішення за допомогою використання вичерпного пошуку, що проводиться на усій допустимій множині. Однак, це також є недоліком детермінованих методів, тому що надійність та ефективність будуть падати при зростанні розмірності завдання [38].

До першої групи методів глобальної оптимізації відносяться наступні методи [38]:

- метод розгалужень та границь;
- метод динамічного програмування;
- методи відсікань;
- метод алгебраїчної геометрії.

При використанні **методу розгалужень та границь** безліч можливих рішень спочатку розбивається на ряд підмножин (розгалужень), а потім, замість повного перебору всіх елементів цих підмножин, розраховуються нижні границі цільової функції, що мінімізується в підмножинах. Далі, та підмножина, у якої нижня границя виявилася найменшою, знову піддається розгалуженню. Інші підмножини тимчасово відкидаються, що дозволяє скоротити перебір. Якщо ж виявилось, що у нових підмножин нижні границі гірші, ніж у будь-яких з тих, що були утворені раніше, то доведеться повернутися на один крок назад, до останнього розгалуження, на якому була утворена більш перспективна підмножина [38].

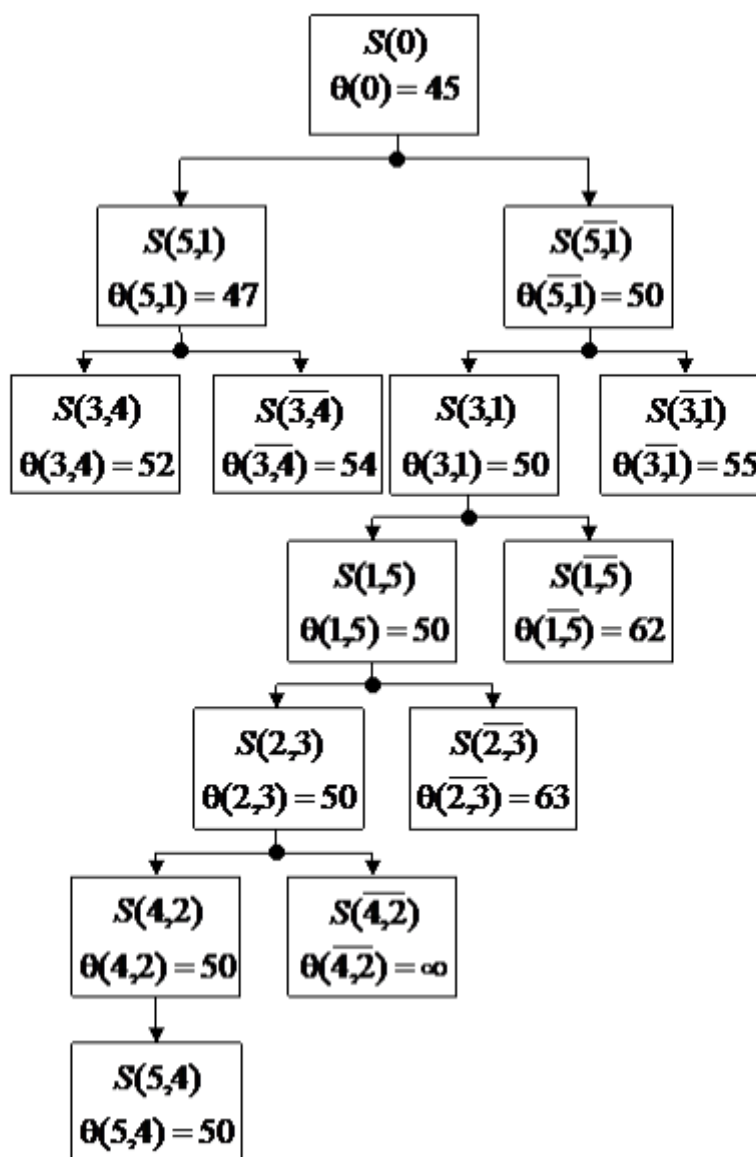


Рисунок 2.10 – Приклад вирішення задачі комівояжера за допомогою методу розгалужень та границь [41]

Динамічне програмування, як науковий напрямок, з'явилося та сформувалося на початку 50-х років XX століття завдяки роботам американського математика Річарда Беллмана та його співробітників [38].

Суть методу динамічного програмування полягає у тому, щоб звести вихідне завдання до деякої впорядкованої сукупності задач меншої розмірності та послідовно вирішувати їх. При цьому на кожному наступному етапі, під час вирішення чергового завдання, використовуються результати вирішення усіх попередніх завдань [38].

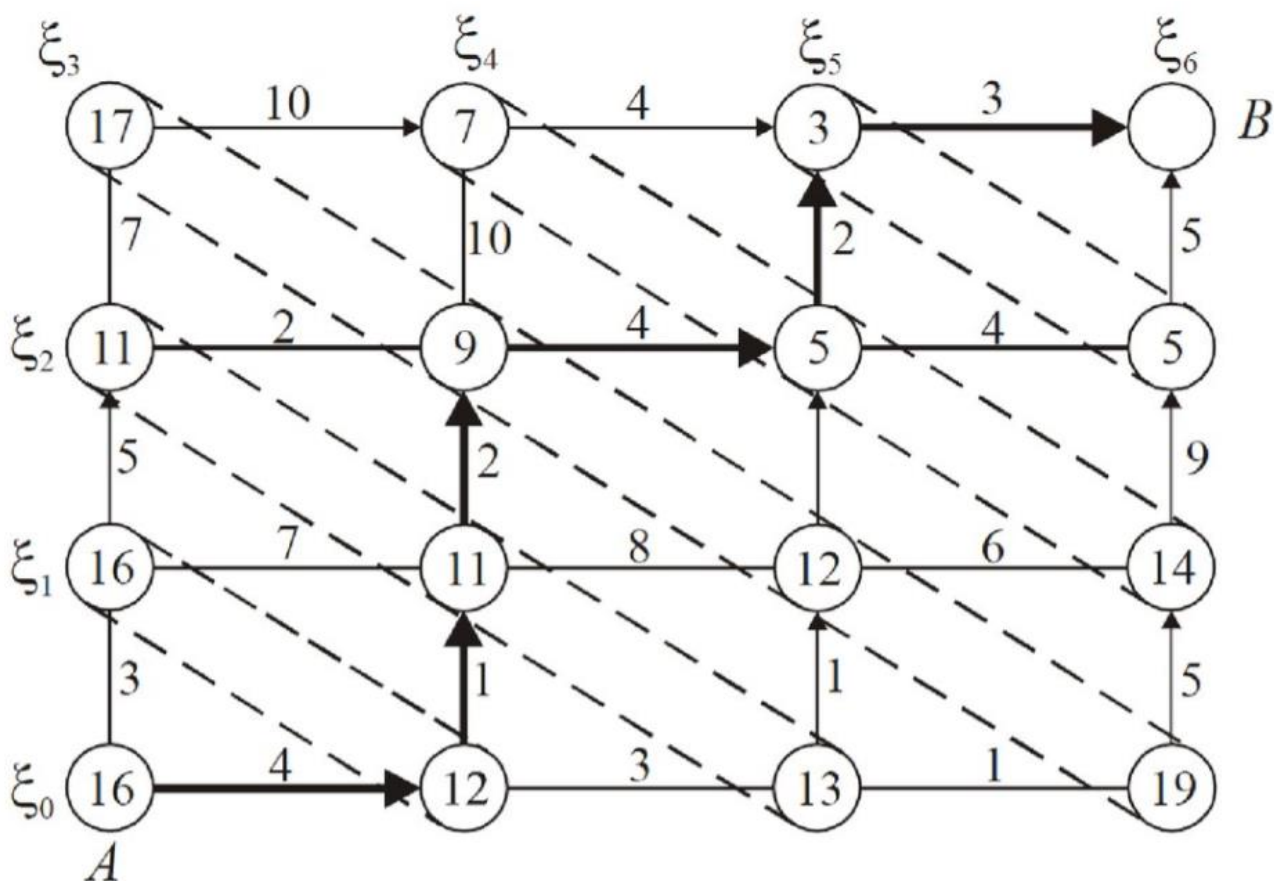


Рисунок 2.11 – Приклад вирішення задачі пошуку оптимального маршруту за допомогою методу динамічного програмування [42]

Розглядаючи **методи відсікань** можна визначити їхню сутність у тому, що завдання спочатку вирішується без використання умови цілісності. Якщо стається так, що отриманий план цілісний, то завдання вважається вирішеним. В іншому випадку до існуючих обмежень завдання додається нове обмеження з наступними властивостями [38]:

- воно повинне відсікати знайдений оптимальний нецілочисельний план;
- воно не повинно відсікати жодного цілого плану;
- воно повинно бути лінійним.

Це додаткове обмеження, з зазначеними властивостями, зветься правильним відсіканням. У подальшому завдання вирішується вже з урахуванням нового обмеження. Додатково, після цього, у разі потреби, може додаватися ще одне обмеження [38].

2.2.2 Методи глобальної оптимізації на основі евристичних та метавевристичних підходів

Друга група методів глобальної оптимізації поділяється на алгоритми, які відносяться до наступних груп [38]:

- еволюційні алгоритми;
- алгоритми ройового інтелекту.

2.2.2.1 Еволюційні алгоритми

До складу методів, що відносяться до групи еволюційних алгоритмів належать [38]:

- генетичні алгоритми;
- еволюційне програмування;
- еволюційні стратегії
- диференційна еволюція.

Генетичний алгоритм можна віднести до групи евристичних методів, які застосовуються для вирішення проблем пошуку та оптимізації. Особливістю цих методів є те, що вони об'єднують у собі елементи стохастичного та детермінованого підходів [38].

Загалом генетичний алгоритм базується на принципі природного відбору (тобто, виживання найбільш пристосованого або найсильнішого). Під час процесу пошуку аналізуються відразу декілька розгалужень еволюції. Потім, випадковим чином, створюється безліч генотипів початкової популяції. Після цього вони оцінюються за допомогою застосування «функції пристосованості», внаслідок чого з кожним окремим генотипом асоціюється деяке певне значення (так звана «пристосованість»), яке визначає наскільки добре фенотип, який він описує, вирішує поставлене завдання. Далі, з урахуванням «пристосованості», з отриманої множини можливих рішень («покоління») вибираються рішення, до яких застосовуються «генетичні оператори» (а саме, «мутація» або «схрещування»), результатом чого є

отримання нових можливих рішень. Для них також обчислюється значення пристосованості, а потім робиться «селекція» найкращих можливих рішень для наступного покоління. Описана вище послідовність дій повторюється ітеративно, таким чином моделюється «еволюційний процес», який буде тривати декілька поколінь, поки не буде виконано критерій зупинки алгоритму [38].

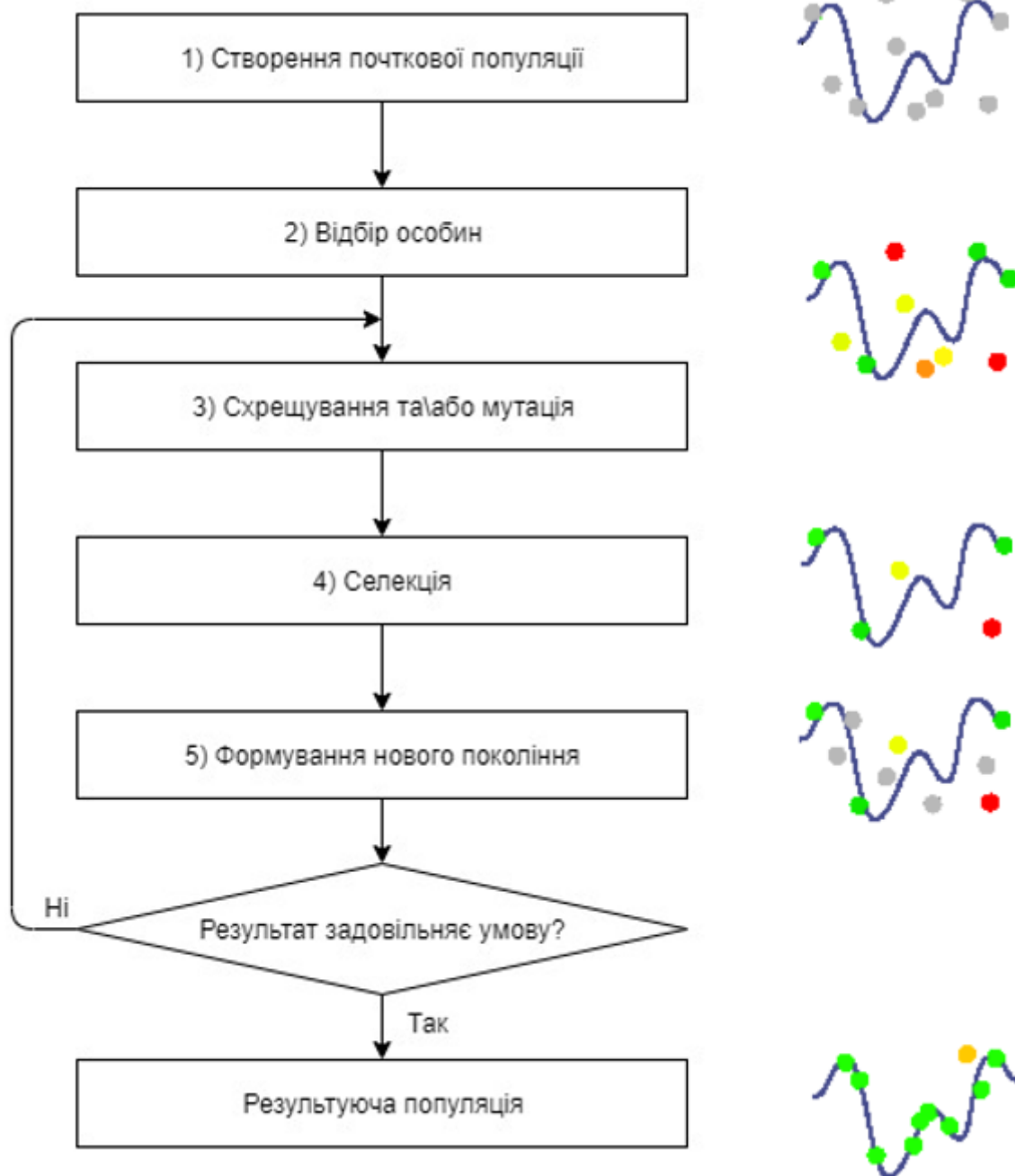


Рисунок 2.12 – Схема та приклад вирішення задачі за допомогою генетичного алгоритму [43]

В основі **еволюційного програмування** ті ж самі принципи, що використовуються у генетичному алгоритмі, але, при цьому, воно містить у собі більше евристичних залежностей, які засновані на ранжованих мутаціях. Еволюційне програмування має широкий спектр використання для вирішення завдань оптимізації, комбінаторних завдань, а також застосовується для машинного навчання [38].

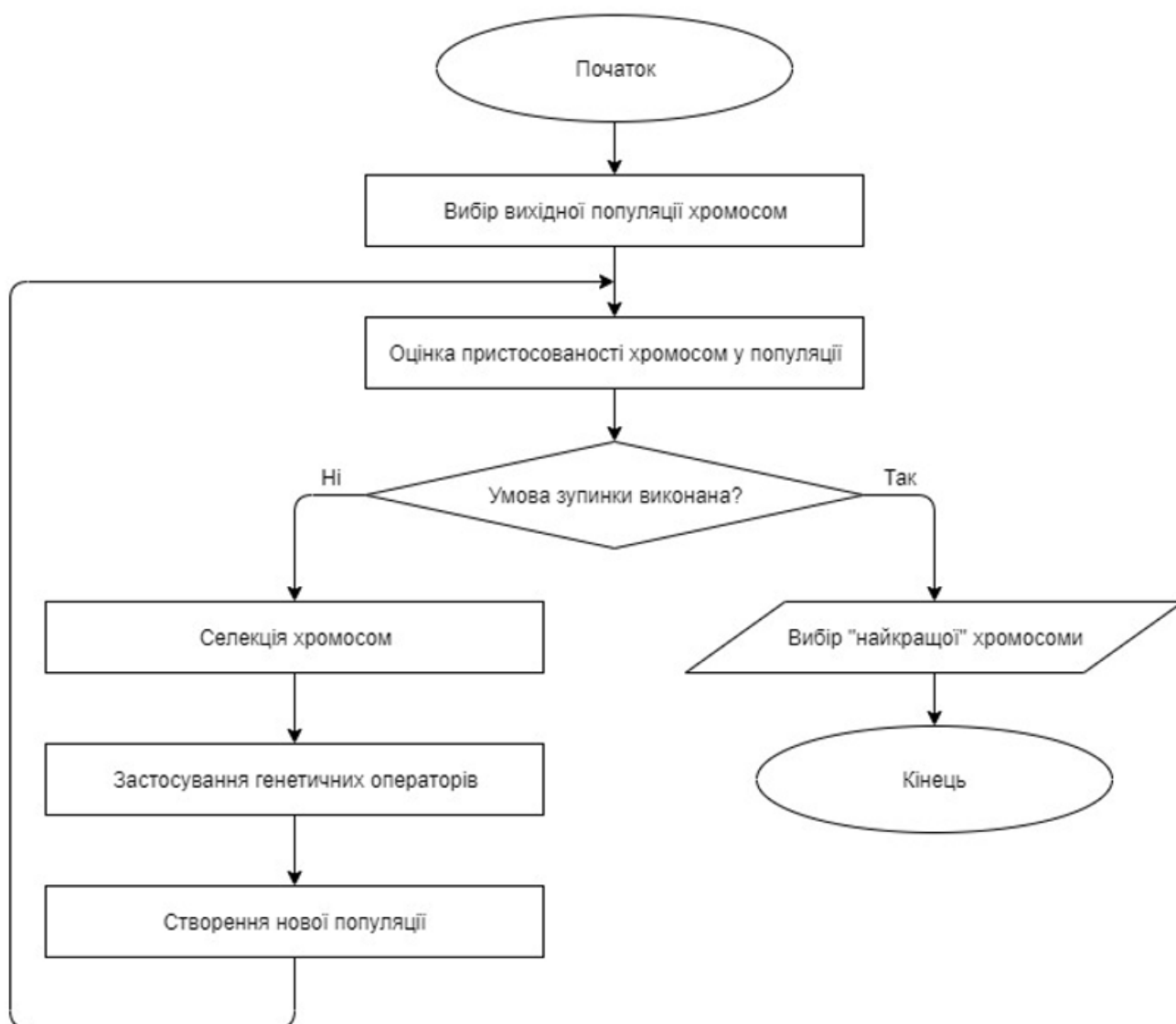


Рисунок 2.13 – Схема роботи методу еволюційного програмування [44]

Серед **еволюційних стратегій** можна виділити еволюційний підхід. Його особливість полягає в тому, що при конструюванні структури індивіда він використовує адаптивний рівень мутації, який може динамічно змінюватися, що, в свою чергу, дозволяє пристосуватися до будь-якої моделі. Еволюційний підхід

використовується в експертних системах, а також, як і еволюційне програмування, застосовується для вирішення завдань в галузі комбінаторики та машинного навчання [38].

Метод диференціальної еволюції є одним з методів еволюційного моделювання та застосовується для вирішення різних завдань багатовимірної оптимізації. За класифікацією оптимізаційних методів, його відносять до класу стохастичних методів, тому що, в процесі пошуку рішення, він використовує генератор випадкових чисел. Окрім цього, він також використовує деякі ідеї генетичних алгоритмів, але, на відміну від них, не потребує роботи зі змінними у бінарному коді підбору [22, 45].

Даний метод є прямим методом оптимізації. Це означає, що під час його роботи потрібно лише обчислення значення цільової функції (критерію оптимізації), без її похідних. Цільові функції, які піддаються оптимізації за допомогою цього методу, загалом, можуть бути нелінійними, недиференційованими, багатоекстремальними та мати досить велику кількість змінних. Цей метод призначений для того, щоб знаходити глобальний мінімум (або глобальний максимум) нелінійних, недиференційованих, мультимодальних (тих, які мають багато локальних екстремумів) функцій від великої кількості змінних. Реалізація та застосування методу є порівняно простими, оскільки він містить доволі малу кількість керуючих параметрів, які потребують підбору [22, 39, 45].

У базовому вигляді, алгоритм можна описати наступною послідовністю дій. Спочатку генерується, так зване, «покоління», що являє собою деяку множину векторів. Під векторами розуміються точки n -вимірного простору, в якому визначена цільова функція $f(X)$, що підлягає мінімізації. На кожній новій ітерації алгоритм створює нове покоління векторів, випадковим чином, комбінуючи між собою вектори з останнього покоління. При цьому, кількість векторів у кожному поколінні є однаковою [22, 39].

Кожне нове покоління векторів генерується наступним чином. Спочатку, для кожного вектора X_i з попереднього покоління, випадковим чином, обираються три

різні вектори v_1, v_2, v_3 (за винятком самого вектора X_i) та генерується, так званий, «мутантний» вектор згідно з формулою (2.16) [22, 39, 46].

$$v = v_1 + F \cdot (v_2 + v_3) \quad (2.16)$$

де F – один з параметрів методу (як правило, це додатна стала на проміжку $[0,2]$).

Після цього над мутантним вектором v здійснюється операція «схрещування», особливість якої полягає у тому, що окремі координати вектору замінюються відповідними координатами від початкового вектору X_i . При цьому кожна координата замінюється з визначеною ймовірністю, значення якої теж є параметром методу. Якщо після схрещування, так званий, пробний вектор виявляється кращим ніж вектор X_i (тобто значення цільової функції зменшилося), то в новому поколінні X_i замінюється на пробний вектор, в іншому випадку залишається X_i [22, 39, 46].

Крім цього варто розглянути **метод адаптивної диференційної еволюції Коші**. Під час використання цього методу, на кожній новій ітерації здійснюється адаптація двох параметрів методу диференційної еволюції, а саме масштабного коефіцієнта F (scaling factor) та коефіцієнта CR (crossover rate), причому для кожної нової точки (індивідуума) незалежно. Така адаптація (коригування) проводиться на основі значень коефіцієнтів F і CR , усереднених серед всіх успішних індивідуумів. Нові значення цих коефіцієнтів для кожної точки генеруються як випадкові величини з розрахованими середніми значеннями та можливими відхиленнями відповідно до розподілу Коші. Застосування такого розподілу, що характеризується подовженим “хвостом”, на практиці призводить до більш швидкого пошуку оптимуму під час розв'язання різноманітних задач з унімодальним та багатомодальним характером оцінної функції в порівнянні з іншими сучасними алгоритмами диференційної еволюції [46, 47].

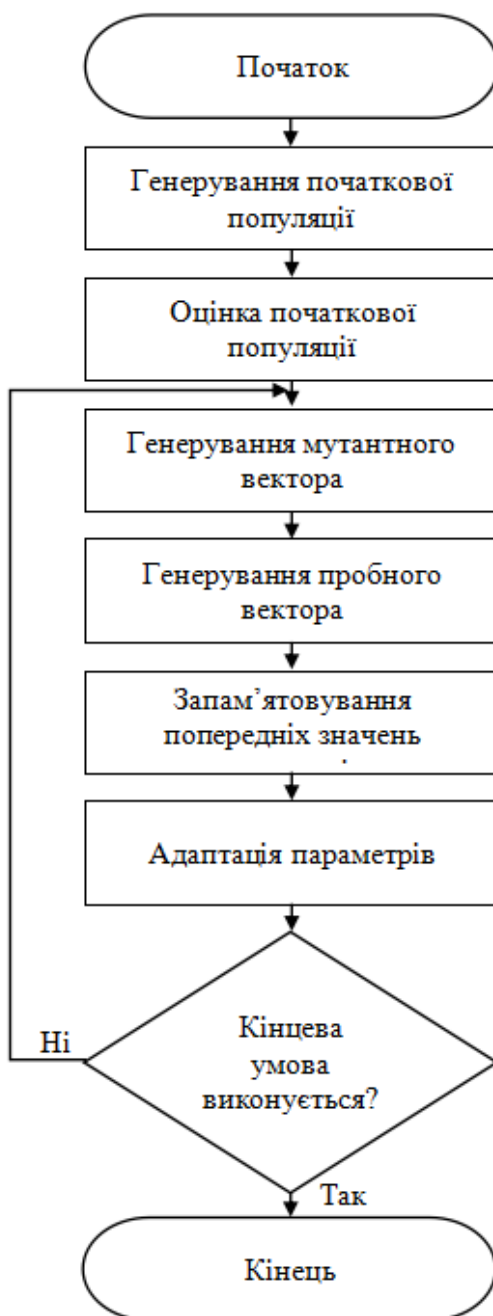


Рисунок 2.14 – Схема роботи методу адаптивного методу диференційної еволюції Коші [48]

2.2.2.2 Алгоритми ройового інтелекту

Алгоритми ройового інтелекту описують колективну поведінку децентралізованої системи, яка самоорганізується. Як правило, системи ройового інтелекту складаються з безлічі «агентів», які взаємодіють між собою та з навколишнім світом на локальному рівні. Якщо розглядати їх поодиночі, то ці

«агенти», зазвичай, постають досить простими та не представляють з себе чогось особливого, але, одночасно локально взаємодіючи між собою, всі разом вони утворюють так званий ройовий інтелект [38].

До складу алгоритмів оптимізації, які засновані на базі ройового інтелекту можна віднести [38]:

- алгоритм рою частинок;
- алгоритм пошуку зграєю вовків;
- алгоритм світляків;
- алгоритм пошуку зозуль.

Подібні алгоритми, зазвичай, частково імітують деякі характеристики та поведінку певного виду тварин. Такі алгоритми можуть знаходити застосування для вирішення завдань як безумовної так і умовної оптимізації функцій речових змінних [38].

Ідея **алгоритму рою частинок** полягає в наступному. Наприклад, існує деяке n -мірний простір (загалом – область пошуку), у якому «нишпорять» частинки (агенти алгоритму). Спочатку ці частинки, випадковим чином, розкидані по всій області пошуку та у кожної частинки є свій, випадковий, вектор швидкості. Потім, у кожній точці, де побувала частинка, розраховується значення цільової функції. При цьому, кожна частинка «запам'ятовує», яке саме значення цільової функції вона особисто знайшла, та де це було. Крім цього, кожна частинка знає де саме розташована та точка, яка буде найкращою серед усіх точок, що розвідали всі частинки. Крім цього частинки коригують свою швидкість (модуль та напрямлення) для кожної ітерації, для того, щоб з однієї сторони, бути якнайближче до найкращої точки, яку частинка знайшла сама (автори цього алгоритму називають даний аспект поведінки «ностальгією»), але, в той же час, наблизитись до точки, яка в даний момент часу є найкращою глобально. Через деяку кількість ітерацій, переважна більшість частинок повинна зібратися доволі близько до найбільш підходящої точки. У ході процесу, ймовірно, частина частинок залишиться десь у відносно підходящому локальному екстремумі. Але, головне, щоб хоча б одна частинка опинилася доволі близько до глобального екстремуму [49].

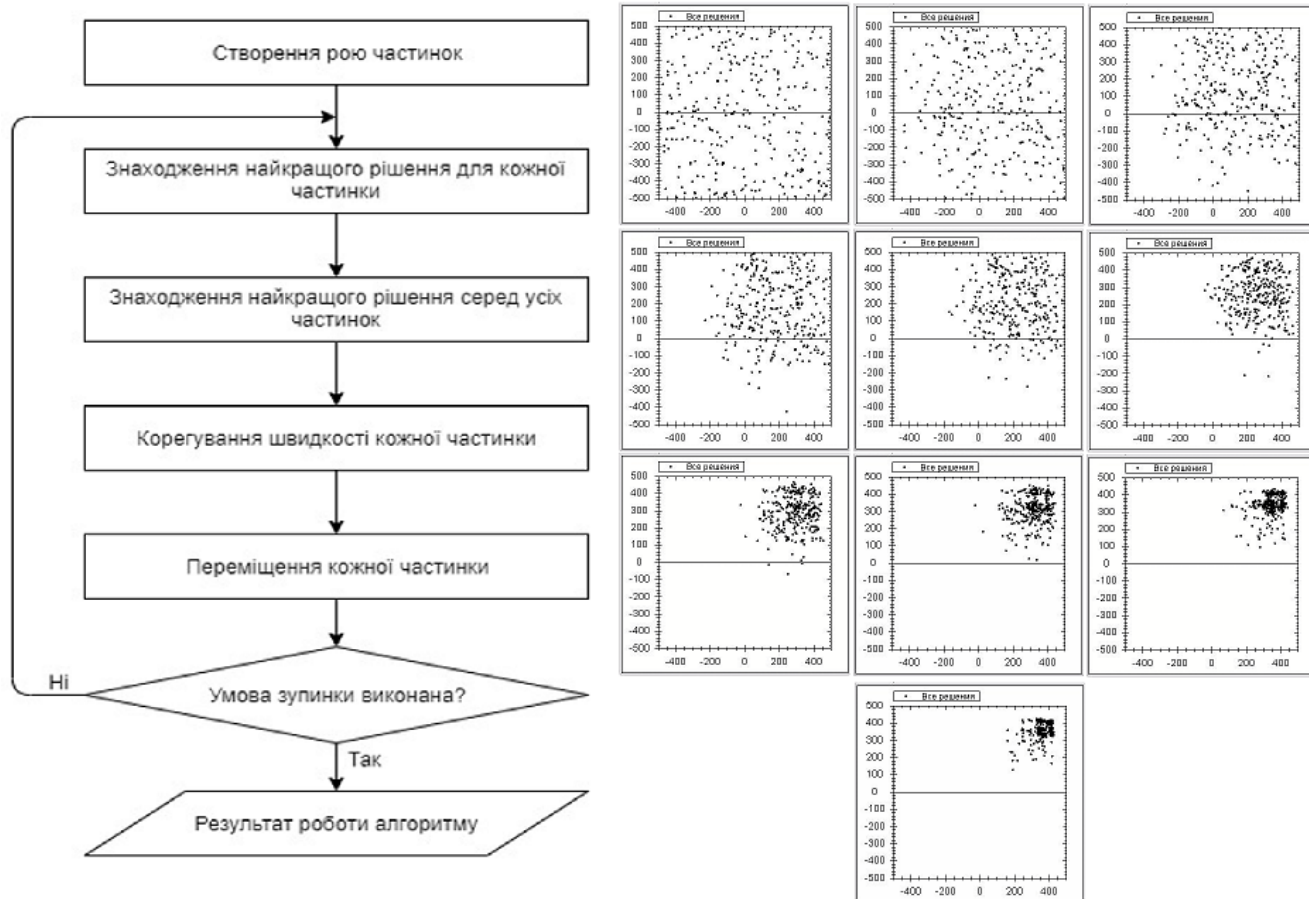


Рисунок 2.15 – Схема та приклад вирішення задачі за допомогою алгоритму рою частинок [49]

Алгоритм пошуку зграєю вовків копіює процес полювання останніх. Нехай, ми маємо деяку місцевість, на якій полюють вовки – це область пошуку під час оптимізації, а зграя – це вовки. Спочатку генерується деяка кількість «вовків» в евклідовому просторі з деякими розмірами, тобто кожен вовк представлений у вигляді вектору, який визначає його координати у просторі. Таким чином, зграя (популяція) постає у вигляді множини можливих рішень, координати яких оновлюються на кожній наступній ітерації, поки не буде знайдено оптимальне рішення або не буде здійснено максимально задана кількість розрахунків цільової функції. Тоді, функція, що характеризує наскільки сильно відчувається запах жертви буде цільовою, а координати жертви – оптимальною точкою. Під час полювання вовки розбиваються на групи, рухаються у різних напрямках та обмінюються інформацією між собою. «Вовк», який має найкраще значення цільової функції на

теперішній ітерації стає лідером, при цьому, якщо на наступній ітерації знайдеться інший «вовк» з ще кращим значенням, то «зграя» зробить лідером його. Лідер зграї «говорить» іншим про місце, де він знаходиться, як про найближче до жертви, щоб вони почали рухатися до нього. Інші вовки в цей час розвідують місцевість у пошуках жертви [50].

Алгоритм світляків – це метаевристичний алгоритм ройового інтелекту, де у ролі агентів пошуку виступають так звані «світляки» [51].

В основі роботи алгоритму лежить поведінка, яку в природі можна спостерігати у світляків. Вони випромінюють світло, використовується для комунікації між різними особинами. За допомогою цього випромінювання вони повідомляють один одного про наближення хижаків, приваблюють особин іншої статі тощо. Менш яскраві світляки переміщуються до більш яскравих, яскравість одного світляка сприймається іншими та зменшується при його віддаленні. У тому випадку, коли світляк не бачить яскравішого представника рою, він переміщується хаотично [51].

Під час роботи алгоритму, кожний «світляк» характеризується позицією та яскравістю. Спочатку, випадковим чином, задається положення кожної «комахи» на визначеному інтервалі. Потім розраховується яскравість світляка за допомогою формули [51]:

$$int = \frac{1}{f(x)+1} \quad (2.17)$$

де $f(x)$ – значення цільової функції, а одиниця додається щоб виключити можливість ділення на нуль.

Якщо яскравість першого (i) світляка менша за яскравість другого (j), то перший переміщується у напрямку другого.

$$pos(i) = pos_0(i) + a \cdot c + \beta \cdot (pos(i) - pos(j)) \quad (2.18)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (2.19)$$

де γ – коефіцієнт поглинання світла середовища, r – відстань між «світляки», $pos_0(i)$ – початкове положення i , $pos(i)$ – нове положення i , β – привабливість j для i , β_0 – привабливість «світляка» при відсутності відстані, тобто, коли вони знаходяться впритул один до одного, s – випадково обране число з проміжку $[0;1]$, a – вільний параметр рандомізації [51].

Якщо після переміщення світляка його розташування виходить за межі деякого визначеного інтервалу, то його задають випадковим чином на даному проміжку. Після перебору всіх особин робиться сортування світляків у порядку спадання по їх яскравості [51].

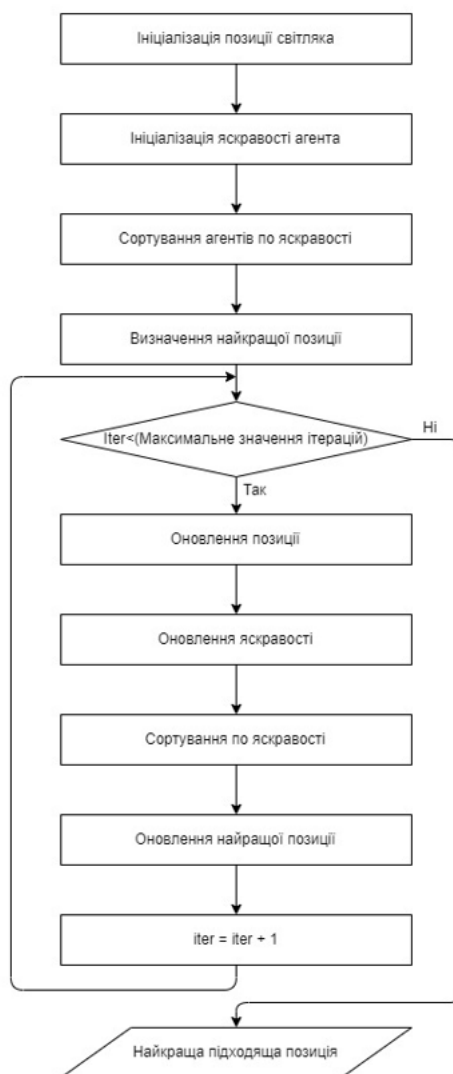


Рисунок 2.16 – Схема роботи алгоритму світляків [51]

2.2.3 Методи глобальної оптимізації на основі стохастичних та термодинамічних підходів

До третьої групи методів глобальної оптимізації можна віднести наступні методи [38]:

- грубий випадковий пошук (метод Монте–Карло);
- стохастичне тунелювання;
- алгоритм імітації відпалу;
- метод пошуку з заборонами.

Грубий випадковий пошук, або метод Монте–Карло, вважається найпростішим алгоритмом випадкового пошуку, але, в той же час, він і найвідомішим з них. Він заснований на принципі випадкового «кидання» точок у простір пошуку, а його головною перевагою є простота. В теорії глобальної оптимізації метод Монте–Карло використовується, як правило, у якості еталону під час чисельного або теоретичного порівняння різних алгоритмів та в якості однієї зі складових частин деяких алгоритмів глобального випадкового пошуку [22, 52, 53].

Стохастичне тунелювання – це підхід у глобальній оптимізації, що базується на функції методу Монте–Карло, яка повинна бути об’єктно мінімізована та нелінійно перетворена, щоб спростити тунелювання між областями, що містять мінімуми цільової функції. Спрощене тунелювання дозволяє швидше досліджувати простір та знаходити задовільне рішення [54].

В основі **алгоритму імітації відпалу** лежить теорія термодинамічного процесу нагрівання та повільного охолодження деякої субстанції для того, щоб отримати кристалічну структуру [38].

Починаючи з випадково обраної точки, в просторі пошуку, робиться крок у випадковому напрямку. У тому випадку, коли результатом цього кроку буде точка з нижчим рівнем значення функції оптимізації, то такий крок приймається. Якщо ж він приводить в точку з великим значення функції оптимізації, то о він приймається з ймовірністю $P(I)$, де I – час. Функція $P(I)$ спочатку близька до одиниці, але потім поступово зменшується до нуля – за аналогією з охолодженням холодного тіла. Таким

чином, на початку процесу моделювання можуть прийматися будь-які кроки, але, коли «температура» починає падати, ймовірність здійснення негативних кроків зменшується. Однак, негативні кроки іноді необхідні. Це трапляється в тих випадках, коли потрібно уникнути локального оптимуму, але, водночас, прийняття занадто багатьох негативних кроків може призвести до відходження результату від глобального оптимуму [38].

На сьогоднішній день метод Монте-Карло досить активно досліджується (швидкий «перевідпал», паралельний відпал) та успішно використовується в безлічі різноманітних областей [38].

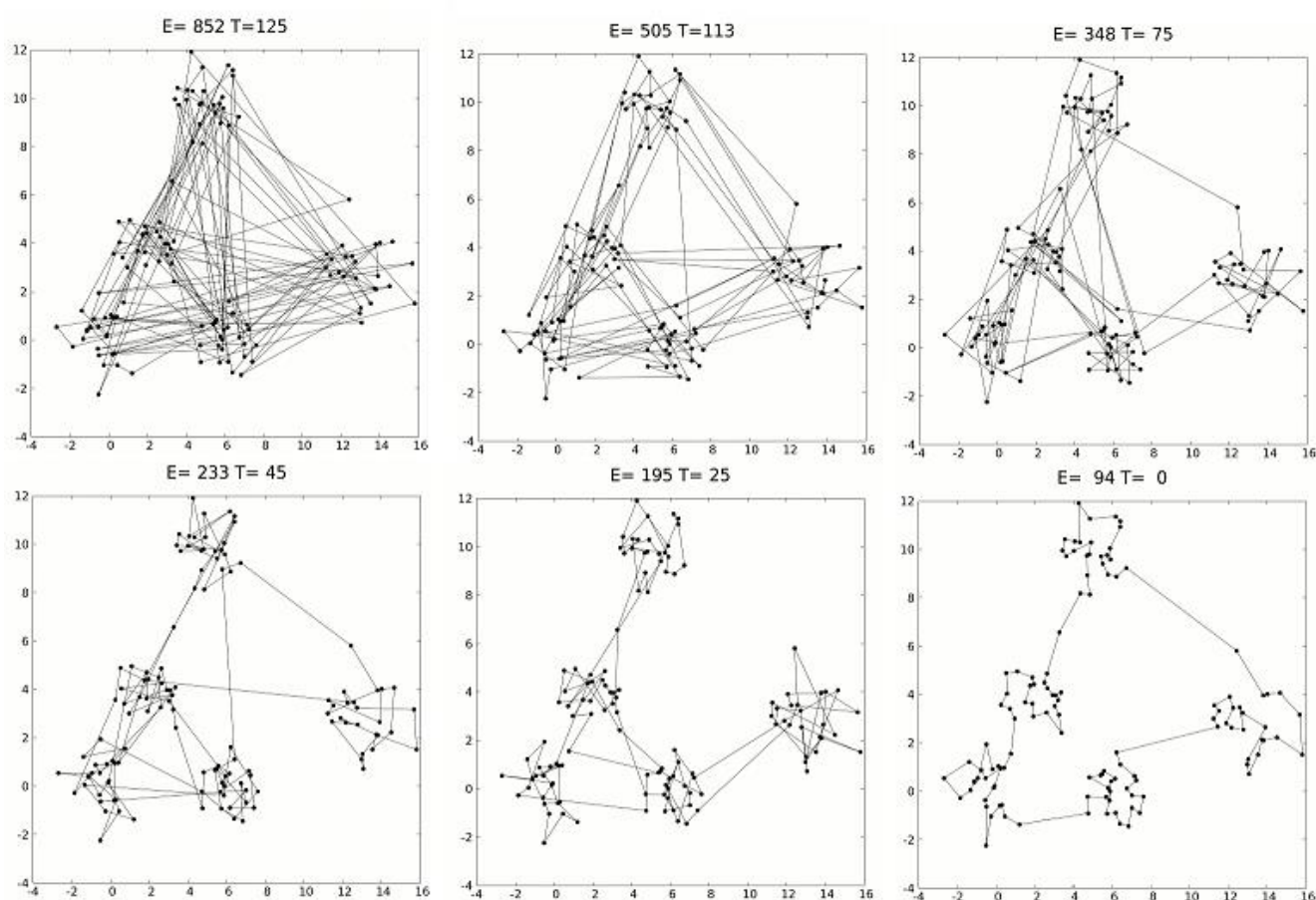


Рисунок 2.17 – Приклад вирішення задачі комівояжера за допомогою методу імітації відпалу [55]

Метод пошуку з заборонами базується на аналогії з людською поведінкою, тобто на присутності у схемі поведінки людини деяких випадкових елементів, які

говорять про те, що в одній і тій же ситуації людина може повести себе різним чином. Збереження листа заборон, у якому, наприклад, може зберігатися набір вже розглянутих раніше точок у просторі пошуку, є однією з головних властивостей цього підходу. Робота алгоритм полягає у виборі випадкової точки у просторі пошуку, розглядання точок з околиці даної точки, та, в разі досягнення визначеного критерію, виборі нової точки в іншому регіоні пошуку, який ще не був розглянутий [56].

2.2.4 Висновки до методів глобальної оптимізації

Серед методів глобальної оптимізації широко розповсюджені як детерміновані, так і стохастичні методи. Існує багато різних методів з певними сильними та слабкими сторонами, кожен з яких має деяку особливість, на якій вони засновані. Загалом, серед переваг цих методів можна виділити порівняну високу стійкість та надійність, а також те, що вони значно спрощують розрахунок конструктора (можуть бути спрощені цілі етапи проектування). Додатково варто відзначити те, що ці методи не потребують розрахунку похідних та знаходять найменше значення цільової функції на всій області допустимих значень. Головними недоліками методів глобальної оптимізації є тривалість їх роботи та ресурсозатратність. Проте, незважаючи на все, при їх застосуванні, результат того вартий.

2.3 Висновки до другого розділу

В даному розділі було розглянуто найпопулярніші сучасні методи локальної та глобальної оптимізації, а також виявлено їх переваги та недоліки.

Головною перевагою методів локальної оптимізації є їх швидкодія, однак, для вирішення поставленої задачі буде доцільніше використовувати методи глобальної оптимізації, оскільки вони дозволяють знайти глобальний оптимум.

Для подальшої роботи та експериментальної перевірки було обрано метод диференційної еволюції Коші для параметричного синтезу оптичних систем ширококутних окулярів.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА

Метою даного розділу є експериментальна перевірка обраного раніше методу оптимізації шляхом автоматизованого розрахунку реальних оптичних систем. Зокрема, для вирішення поставленої задачі, було синтезовано п'ять оптичних систем для ширококутних окулярів, що складаються з семи, восьми, дев'яти та десяти лінз. Два з них буде розглянуто детальніше. Під час оптимізації було знайдено не лише радіуси кривизни поверхонь та осьові товщини, а й марки скла. Значення радіуса кривизни останньої поверхні використовувалось для контролю фокусної відстані окуляра.

3.1 Запропонований підхід

Для синтезу оптичних систем ширококутних окулярів буде використовуватися один із основних сучасних методів глобальної оптимізації – метод диференційної еволюції Коші.

Алгоритми глобальної оптимізації широко застосовуються у багатьох сучасних програмах, які використовуються для автоматизованого проектування оптичних систем: Synopsys Optical Solutions «CODE V», Lambda Research Corporation «OSLO», Zemax LLC «OpticStudio» та інші. Варто зауважити, що алгоритми глобальної оптимізації, які закладено в перерахованому програмному забезпеченні, не є доступними для загального розгляду, тому проаналізувати та порівняти ці методи не має можливості. Через це в даній роботі буде розглянуто автоматизований спосіб розрахунку оптичних систем ширококутних окулярів на базі спеціалізованого програмного забезпечення «PODIL» з використанням методу диференційної еволюції Коші.

Програма має декілька основних вікон інтерфейсу.

У вікні «**Параметри системи**» вказуються конструктивні параметри оптичної системи, екстра-параметри, описуються апертури поверхонь, орієнтації поверхонь у просторі тощо.

Параметри системи

Тип апертури: Діаметр вхідної зіниці

Величина апертури: 4

Апертурна поверхня: 1

Тип уточнення апертур: Увімкнено (Абераційна висота АД)

Похибка розрахунку променів на АД: 1E-06

Відлікова поверхня ОРХ: Сфера вихідної зіниці (рекомендується)

Параксіальні промені: Ігнорувати зміну координат (рекомендується)

Відступ світлових висот, %: 0

Відступ світлових висот, мм: 0

☒ Швидкий розрахунок світлових висот

☐ Телецентрична в просторі парам.

Тип аподизації: Немає

Коеф. аподизації: 1

☒ Викор. кеш уточнення апертур

☐ Викор. алгоритм зменшення поля

☐ Викор. сітку променів для уточнення апертур

☐ Масштабувати зсуви зіниці по полю

Зсув зіниці: X: 0 Y: 0 Z: 0

Стиснення зіниці: X: 0 Y: 0

Точки поля \ Вільєтування

Тип поля: Предметом

☒ Віддалений предмет ☐ Віддалене зображ.

Викор.	Абс. поле X	Абс. поле Y	Вага	Зсув X	Зсув Y	Масштаб X	Масштаб Y
☒ 1	0	0	5	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☒ 2	0	7,5	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☒ 3	0	15	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☒ 4	0	30	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☒ 5	0	45	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☐ 6	0	0	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☐ 7	0	0	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☐ 8	0	0	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☐ 9	0	0	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☐ 10	0	0	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☐ 11	0	0	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
☐ 12	0	0	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Сортувати Визначити вільєтування Очистити вільєтування

Рисунок 3.1 – Вікно «Параметри системи»

Вих. дані

Таблиця поверхонь × Таблиця зум (конфігурацій) Звіт про вихідні дані

Базові дані Екстра Апертура поверхні Орієнтація до пов. Орієнтація після пов. Зовнішній вигляд

№ пов.	АД	Тип поверхні	Радіус X	Радіус Y	Товщина	Середовище	Світлова висота	Кон
► Предмет	●	Стандартна		∞	∞		0.000000 За променями	
1 (АД)	●	Стандартна		∞	16.000000		2.000000 За променями	
2	○	Стандартна		-25.923452 Змінний -0.045...-0.02	7.451933 Змінний 4...12	1.726; 57.7 (H-LAK52) Змінний Каталог: CDGM2018	13.935687 За променями	
3	○	Стандартна		-21.171052 Змінний -0.06...-0.01	4.878461 Змінний 0.1...10		16.711924 За променями	
4	○	Стандартна		362.657810 Змінний -0.03...0.02	11.406254 Змінний 4...13	1.779; 81.2 (H-ZPK5) Змінний Каталог: CDGM2018	24.855875 За променями	
5	○	Стандартна		-42.172430 Змінний -0.03...0.01	5.241136 Змінний 0.1...9		25.460481 За променями	
6	○	Стандартна		129.617319 Змінний -0.03...0.03	6.005829 Змінний 4...12	1.782; 52.3 (H-LAK53A) Змінний Каталог: CDGM2018	26.503535 За променями	
7	○	Стандартна		-275.767311 Змінний -0.03...0.03	0.100503 Змінний 0.1...5		26.396194 За променями	
8	○	Стандартна		32.580832 Змінний -0.03...0.05	11.408817 Змінний 4...14	1.693; 65.9 (D-ZPK1A) Змінний Каталог: CDGM2018	24.317415 За променями	
9	○	Стандартна		185.933851 Змінний -0.03...0.04	3.122857 Змінний 1...6		23.480228 За променями	
10	○	Стандартна		-411.386394 Змінний -0.02...0.01	2.416632 Змінний 2...11	1.72; 29.5 (ZF3) Змінний Каталог: CDGM2018	22.835868 За променями	
11	○	Стандартна		25.000060 Змінний -0.02...0.04	9.992552 Змінний 2...10	1.803; 69.9 (H-LAK52) Змінний Каталог: CDGM2018	19.183762 За променями	
12	○	Стандартна		32.892062 Змінний	6.051716 Змінний		17.336124 За променями	

Рисунок 3.2 – Таблиця з параметрами оптичних поверхонь (конструктивними параметрами)

ЗВІТ ПРО КАРДИНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТА

"PODIL" Версія 1.0[153] Beta

файл: Wide-angle Eyepiece 9-lens 90deg 16mm F4 F-Omega Run2 !!!.podil
Дата: понеділок, 14 листопада 2022 р.
Час: 16:44

Перша поверхня: 1
Остання поверхня: 19
Орієнтація: Y-Z

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 кардинальних параметрів оптичної системи

У інтерфейсі програми в режимі аналізу, можуть бути показані 2D схема оптичної системи, графіки базових аберацій та їх текстовий опис, точкові діаграми, графіки функції розсіювання лінії, функції розсіювання точки, функції концентрації енергії, середньоквадратичного відхилення, модуляційної передавальної функції, число Штреля тощо.

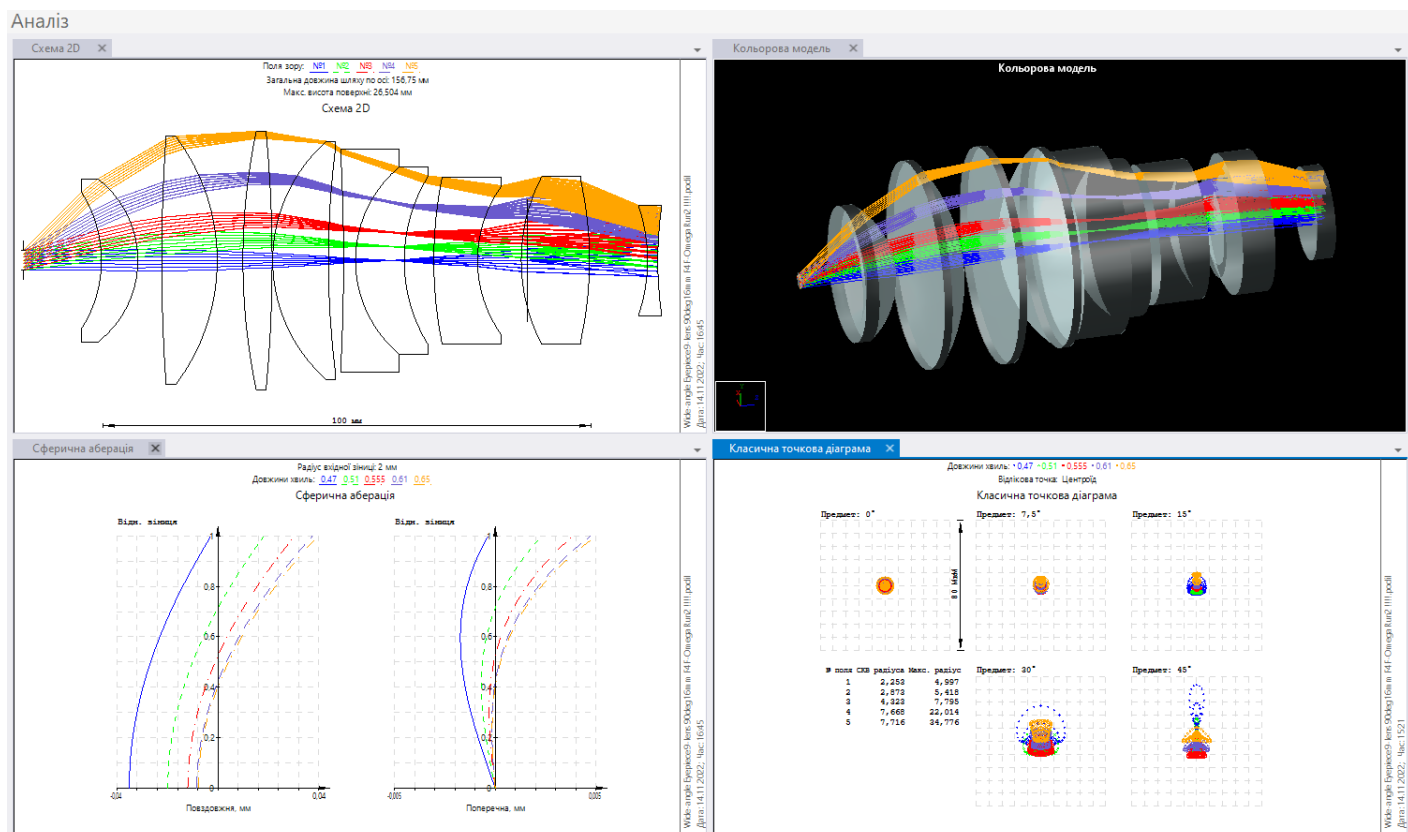


Рисунок 3.4 – Інтерфейс програми в режимі аналізу

У вікні «Оптимізація» проводиться оптимізація оптичної системи. Тут показана таблиця оцінної функції, у якій можна сформувати стандартну оцінну функцію та встановити додаткові обмеження й значення певних параметрів.

Таблиця оціночної функції		Простір змінних	Звіт про оціночну функцію		Пошук найкращої асферики		Підбір пробних пла	
№	% Значення	Тип елемента				Бажане	Вага	
1	0.00000	Різниця ТКР по модулю, $\times 1.0E-6$ Початкова поверхня: 8 Кінцева поверхня: 10			0	0.000000	0.000000	
	2.200000							
2	0.00000	Різниця ТКР по модулю, $\times 1.0E-6$ Початкова поверхня: 10 Кінцева поверхня: 11			0	0.000000	0.000000	
	2.700000							
3	0.00000	Найбільший по модулю з елементів (для групи) Елемент №1: 1 Елемент №2: 2			0	0.000000	0.000000	
	2.700000							
4	0.00000	Максимум елемента № елемента: 3			0	3.000000	1.000000	
	3.000000							
5		<Пусто>			0			
6	0.00000	Координата Y дійсного променя Пов.: 19 № довжини хвилі: 1			0	0.000000	0.000000	
	12.519422							
7	0.00000	Координата Y дійсного променя Пов.: 19 № довжини хвилі: 3			0	0.000000	0.000000	
	12.507224							
8	0.00000	Координата Y дійсного променя Пов.: 19 № довжини хвилі: 5			0	0.000000	0.000000	
	12.518449							
9	0.00000	Найбільший по модулю з елементів (для групи) Елемент №1: 6 Елемент №2: 8			0	0.000000	0.000000	
	12.519422							
10	0.00000	Найменший по модулю з елементів (для групи) Елемент №1: 6 Елемент №2: 8			0	0.000000	0.000000	
	12.507224							
11	0.21000	Різниця двох елементів Елемент №1: 9 Елемент №2: 10			0	0.000000	0.100000	
	0.012198							
12		<Пусто>			0			
13	0.00000	Загальна товщина системи			0	0.000000	0.000000	
	129.999844							
14	0.00000	Максимум елемента № елемента: 13			0	130.000000	1.000000	
	130.000000							
15		<Пусто>			0			
16	0.00000	Кут падіння дійсного променя (в градусах) Пов.: 15 № довжини хвилі: 3			0	0.000000	0.000000	
	31.147961							

Рисунок 3.5 – Таблиця складових оціночної функції

Таблиця оціночної функції		Простір змінних	Звіт про оціночну функцію		Пошук найкращої асферики		Підбір пробних пластин	
	№	Тип	Розподіл змінних	Міні.	Макс.	Найкраще		
▶	1	Пов. 2: Радус Y		-0.045	-0.02	-0.0350652		
	2	Пов. 2: Товщина		4	12	7.72135		
	3	Пов. 3: Радус Y		-0.06	-0.01	-0.0554		
	4	Пов. 3: Товщина		0.1	10	3.28131		
	5	Пов. 4: Радус Y		-0.03	0.02	0.00423355		
	6	Пов. 4: Товщина		4	13	6.4615		
	7	Пов. 5: Радус Y		-0.03	0.01	-0.0116123		
	8	Пов. 5: Товщина		0.1	9	3.39994		
	9	Пов. 6: Радус Y		-0.03	0.03	0.0127105		
	10	Пов. 6: Товщина		4	12	10.8858		
	11	Пов. 7: Радус Y		-0.03	0.03	-0.0056978		
	12	Пов. 7: Товщина		0.1	5	1.63675		
	13	Пов. 8: Радус Y		-0.03	0.05	0.0253656		
	14	Пов. 8: Товщина		4	14	10.897		
	15	Пов. 9: Радус Y		-0.03	0.04	0.00325019		
	16	Пов. 9: Товщина		1	6	4.31198		
	17	Пов. 10: Радус Y		-0.02	0.01	-0.0105254		
	18	Пов. 10: Товщина		2	11	5.65711		
	19	Пов. 11: Радус Y		-0.02	0.04	-0.00450077		
	20	Пов. 11: Товщина		2	10	4.20762		
	21	Пов. 12: Радус Y		-0.02	0.05	0.00883498		
	22	Пов. 12: Товщина		1	11	2.8846		
	23	Пов. 13: Радус Y		-0.04	0.04	0.0114228		
	24	Пов. 13: Товщина		2	9	8.53928		
	25	Пов. 14: Радус Y		-0.04	0.05	0.0264027		
	26	Пов. 14: Товщина		0.1	12	4.00506		
	27	Пов. 15: Радус Y		-0.04	0.04	0.00536265		
	28	Пов. 15: Товщина		2	14	4.73568		
	29	Пов. 16: Радус Y		-0.04	0.05	0.0226357		
	30	Пов. 16: Товщина		1	18	3.9059		
	31	Пов. 17: Радус Y		-0.04	0.04	0.00319866		
	32	Пов. 17: Товщина		2	7	5.64436		

Рисунок 3.6 – Вікно з поточним станом глобального оптимізатора, у якому відображаються діапазони значень та поточні значення всіх заданих параметрів оптимізації

3.2 Алгоритм автоматизованого розрахунку

Загалом, автоматизований розрахунок оптичної системи можна умовно розподілити на дві стадії:

1. Стадія підготовки;
2. Стадія генерування.

Стадія підготовки складається з наступних фаз:

1) Конструктор задає початкову систему у вигляді, яка складається з плоско–паралельних пластин, визначає кількість елементів системи та задає загальну структуру оптичної системи;

2) Конструктор вказує всі зовнішні параметри системи: довжини хвиль, поле зору, апертурну діафрагму та інші;

3) Конструктор обирає параметри оптимізації оптичної системи та генерується оцінна функція. Генерація оцінної функції служить для мінімізації середньоквадратичних значень радіусів точкових діаграм. Крім цього, під час даної фази конструктор може задати додаткові обмеження та діапазони допустимих осьових товщин елементів по краю, максимальне значення окремих аберацій та інші.

Стадія генерування, в свою чергу, полягає, безпосередньо, в процедурі глобальної оптимізації за обраним алгоритмом, тому дана стадія триває досить довго. При потребі, також, можна додатково вплинути значення модуляційної передавальної функції на деякій визначеній просторовій частоті.

При завершенні автоматизованого розрахунку оптичної системи застосовуються методи локальної оптимізації.

3.3 Приклади чисельного моделювання

3.3.1 Загальні положення

Для оптичних систем окулярів розрахунок та аналіз аберацій часто виконують в зворотному ході променів, адже в прямому ході такі системи мають нескінченно

віддалені площини зображень. У зв'язку з цим, в даному випадку вхідні зіниці розглянутих оптичних систем збігаються з апертурною діафрагмою, в ролі якої виступає зіниця ока.

Автоматизація розрахунків досягається за рахунок застосування сучасного алгоритму глобальної оптимізації та використання спеціального програмного забезпечення.

3.3.2 Параметричний синтез восьмилінзового ширококутного окуляра, зі зменшеною класичною дисторсією

В даній роботі було здійснено параметричний абераційний синтез оптичної системи ширококутного восьмилінзового окуляра з полем зору 90° , який призначений для роботи у видимому спектральному діапазоні (0,47...0,65 мкм) та може використовуватися у телескопах або мікроскопах [57].

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

- загальна кількість лінз – 8;
- кутове поле зору в просторі предметів – 90° ;
- спектральний діапазон – видимий (0,47...0,65 мкм);
- задня фокусна відстань – 14,08 мм;
- діаметр вхідної зіниці – 4 мм (в даній оптичній системі вхідна зіниця є одночасно й апертурною діафрагмою);
- віддалення зіниці від зовнішньої поверхні окуляра – 16 мм;
- діапазон допустимих осьових товщин лінз – 2,5...11 мм;
- діапазон допустимих осьових повітряних проміжків – 0,1...10 мм;
- діапазон кривизни оптичних поверхонь – (-0,08...0,08) мм;
- мінімальна товщина лінз на краю – 1,8 мм;
- мінімальна товщина повітряних проміжків на краю – 1 мм;

- максимальне значення відносної дисторсії по полю для основної довжини хвилі – 10%.

Контроль фокусної відстані здійснювався заданим регулятором – кутом апертурного променя на вході системи. При заданому діаметрі входної зіниці (4 мм) тангенс цього кута дорівнював -0,142 [57].

Для параметричного синтезу стартова оптична схема задавалася довільно (в даному випадку – у формі плоско-паралельних пластин), а оцінна функція генерувалася для мінімізації середньоквадратичних значень радіусів точкових діаграм з пошуком найкращих марок скла з каталогів SCHOTT та CDGM. При цьому алгоритмом глобальної оптимізації досліджувався заданий багатовимірний простір пошукових з розміром популяції 100 на кожну змінну. Загалом оптимізація відбувалася по 46 параметрам [57].

Критерієм оптимізації була мінімізація розмірів світлових плям в площині зображень.

Отримана 2D модель синтезованої оптичної системи окуляра наведена нижче, на рис. 3.7.

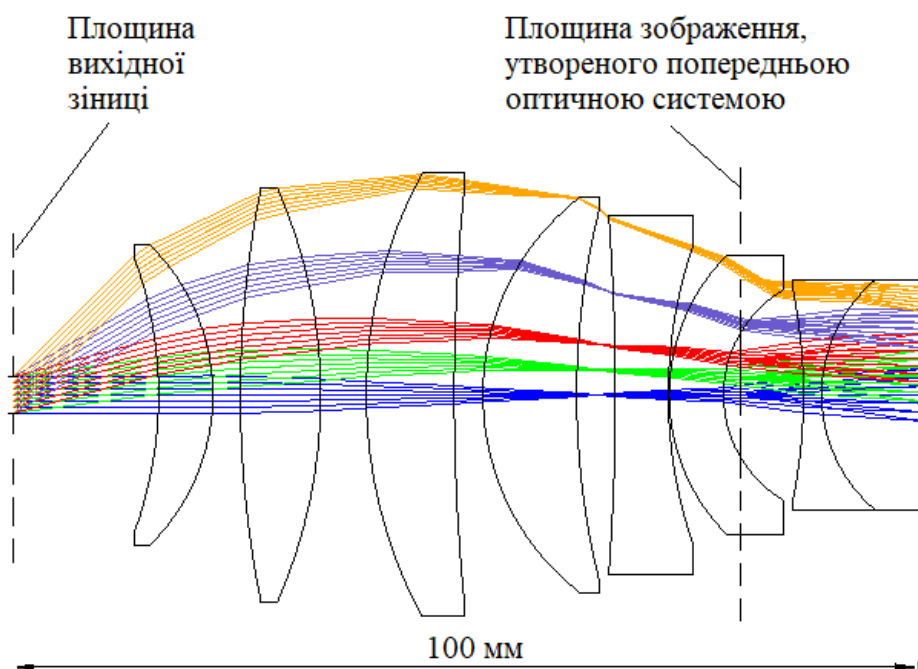


Рисунок 3.7 – Оптична схема отриманого восьмилінзового окуляра з ходом променів [57]

Конструктивні параметри синтезованого окуляра наведено нижче, в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Конструктивні параметри воєсмилінзового окуляра

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщина, мм	Середовище	Світловий радіус, мм
Предмет	∞	∞	–	–
1 (Апертурна діафрагма)	∞	16	–	2
2	–44,299	5,990	H–LAK52	15,28
3	–23,180	3,014	–	16,51
4	115,640	8,863	N–PK51	22,39
5	–56,663	4,998	–	22,80
6	51,814	9,675	H–ZPK5	24,41
7	234,421	3,159	–	23,77
8	27,600	10,333	H–ZLAF69	21,85
9	85,245	4,261	–	20,63
10	–270,845	5,812	H–LAK53B	19,82
11	50,764	0,101	–	16,64
12	21,843	5,995	N–LASF31	15,42
13	13,501	8,801	–	11,63
14	–59,234	2,001	H–ZPK3	11,68
15	16,605	10,990	SFL57	12,67
16	102,465	–19,869	–	12,27
Зображення	∞	0	–	12,76

Якість зображення можна оцінити за точковими діаграмами, що представлені на рис. 3.8, графіками поліхроматичних модуляційних передавальних функцій для різних точок поля зору, що представлені на рис. 3.9, та графіком дисторсії, що представлений на рис. 3.10. Крім цього, на рис. 3.11, представлені точкові діаграми з дефокусуванням.

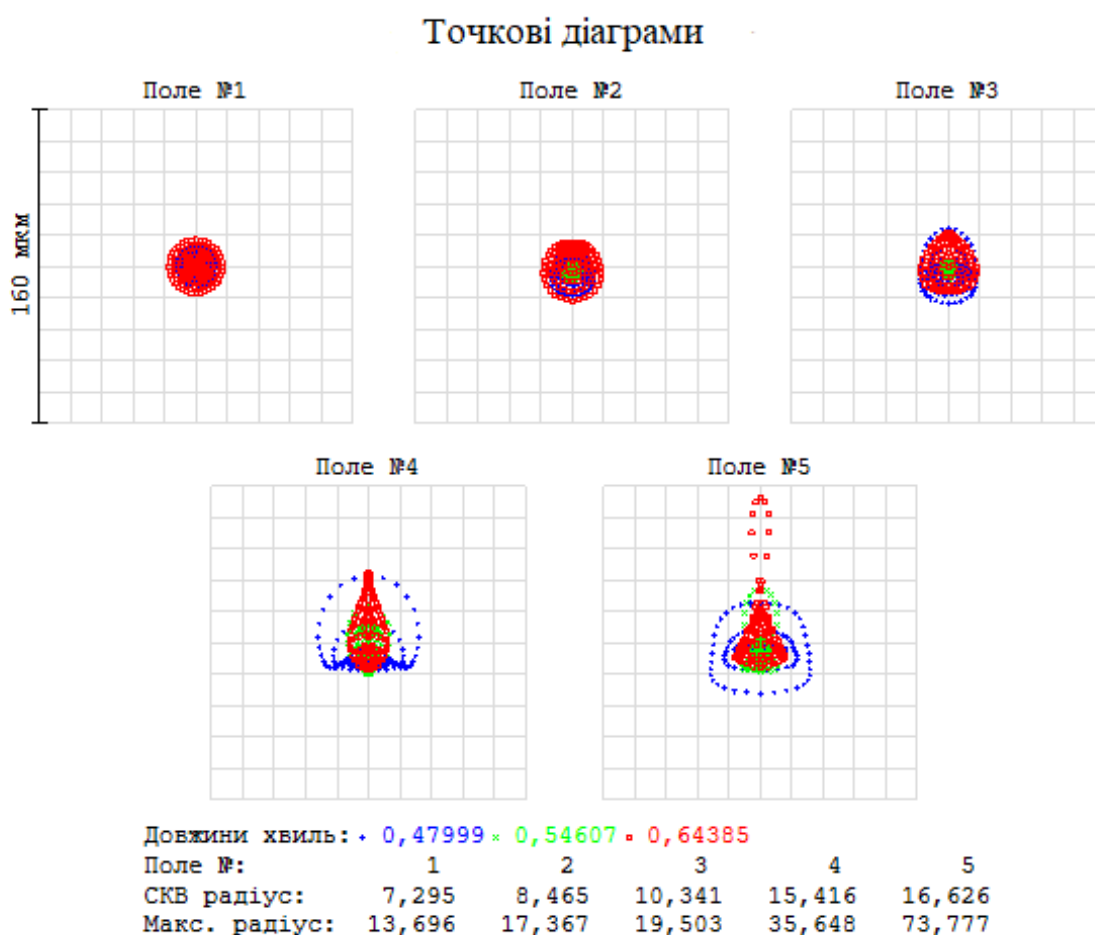


Рисунок 3.8 – Точкові діаграми синтезованого окуляра

Як видно з рис. 3.8, максимальне значення середньоквадратичних радіусів світлових плям в поліхроматичному світлі не перевищує 74 мкм.

Про високу якість зображення отриманої оптичної системи також свідчать графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій, представлені на рис. 3.9.

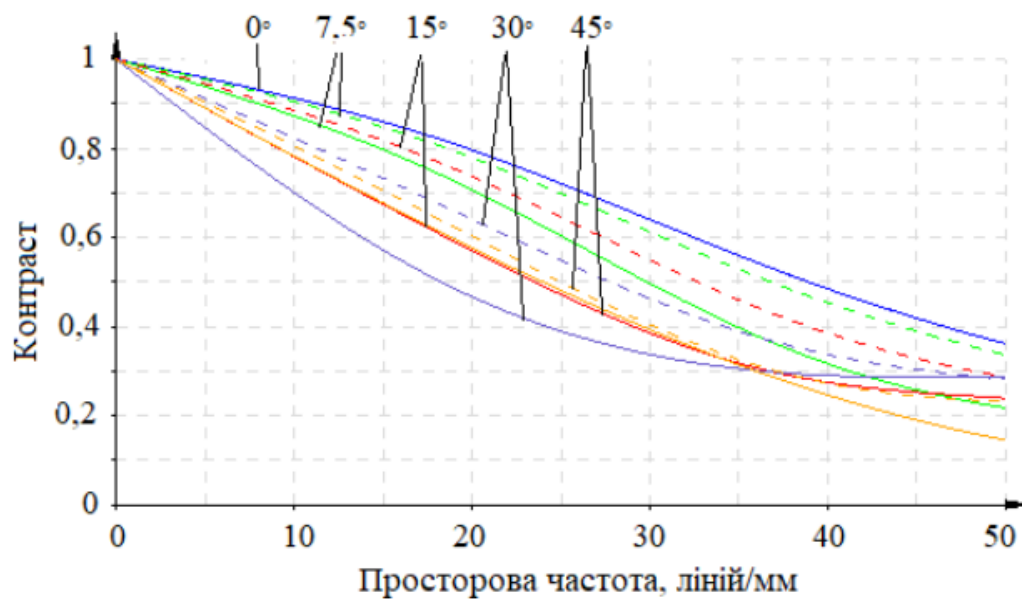


Рисунок 3.9 – Графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій синтезованого окуляра для різних точок поля зору; суцільні криві – для меридіональної площини; пунктирні – для сагітальної [57]

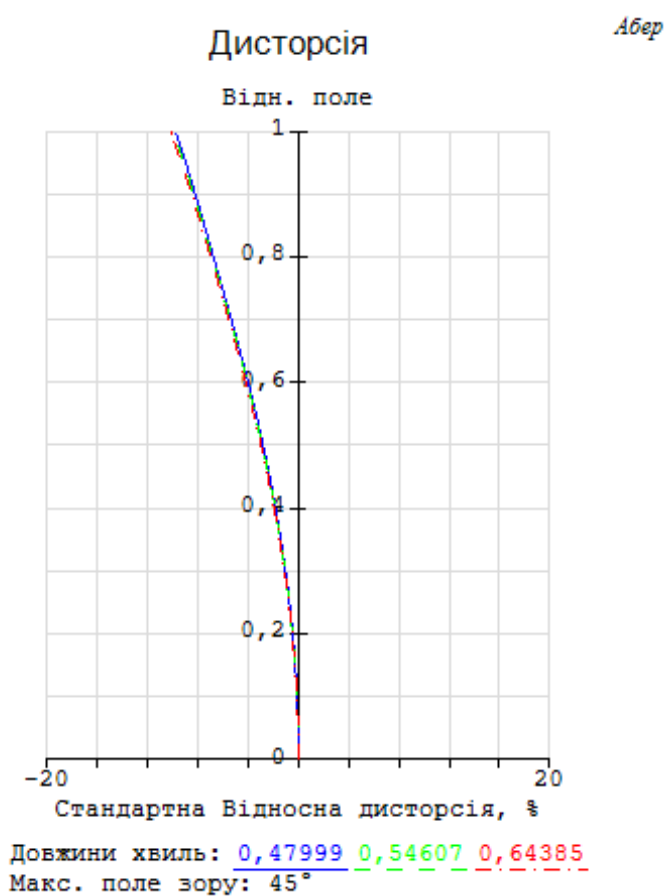


Рисунок 3.10 – Графік дисторсії синтезованого окуляра

Як видно з рис. 3.10, дисторсія не перевищує 10%.

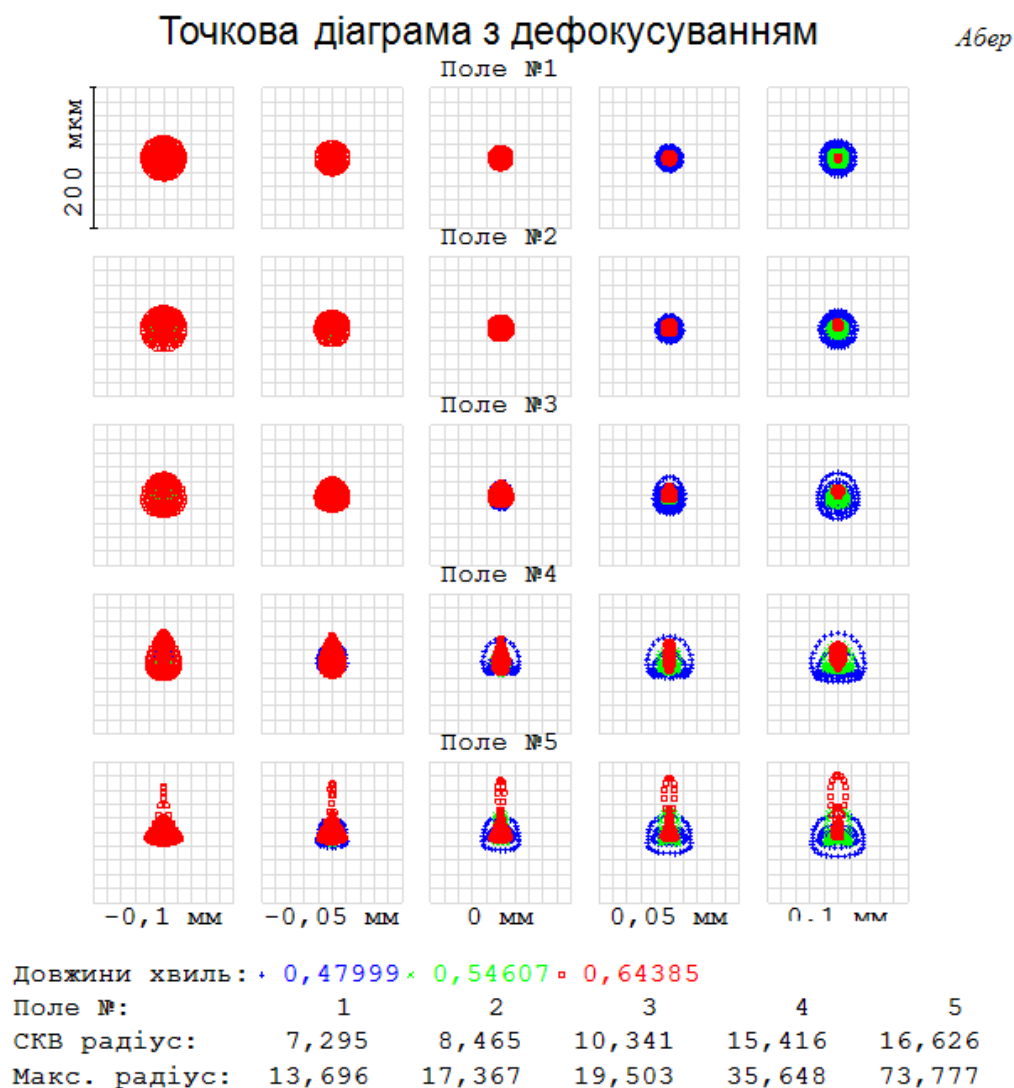


Рисунок 3.11 – Точкові діаграми з дефокусуванням оптичної системи синтезованого окуляра

Проведений параметричний абераційний синтез оптичної системи восьмилінзового ширококутного окуляра зі зменшеною класичною дисторсією підтвердив ефективність автоматизованого розрахунку за допомогою програмного забезпечення PODIL, призначеного для проєктування оптичних систем. Отримані результати вказують на високу якість зображення, утворюваного синтезованою оптичною системою окуляра. Перевагами отриманої оптичної системи є велике

кутове поле зору (90°), помірна дисторсія (не більше 10%) та достатнє для практики віддалення зіниці (16 мм).

3.3.3 Параметричний синтез серії ширококутних окулярів, виправлених на тета-дисторсію

В даній роботі здійснено параметричний абераційний синтез серії оптичних систем ширококутних окулярів з різною кількістю лінз для використання у телескопах або мікроскопах. Окуляри забезпечують кутове поле зору 90° , видиме збільшення $17,9\times$, діаметр вихідної зіниці 4 мм та її віддалення 16 мм. Під час автоматизованого розрахунку оптичних систем висувалися вимоги до корекції тета-дисторсії та досягнення найвищої якості зображення [58].

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

- загальна кількість лінз – 7, 8, 9 і 10;
- кутове поле зору в просторі предметів – 90° ;
- спектральний діапазон – видимий (0,47...0,65 мкм);
- видиме збільшення – $17,9\times$;
- діаметр апертурної діафрагми (зіниці ока) – 4 мм;
- віддалення апертурної діафрагми від окуляра – 16 мм;
- діапазон допустимих осьових товщин лінз – 2...16 мм;
- діапазон допустимих осьових повітряних проміжків – 0,1...20 мм;
- діапазон кривизни оптичних поверхонь – (-0,05...0,05) мм;
- мінімальна товщина лінз на краю – 2 мм;
- мінімальна товщина повітряних проміжків на краю – 1 мм;
- максимальна осьова товщина системи – 114 мм;
- максимальне значення відносної тета-дисторсії по полю для основної довжини хвилі – 0,5%.

Зрозуміло, що задане значення видимого збільшення $17,9\times$ відповідає задній фокусній відстані, що дорівнює $250/17,9=14$ мм. Під час пошуку розв'язку зазначена фокусна відстань системи була зафіксована регулятором радіусу останньої оптичної поверхні, який гарантував незмінне значення кута апертурного променя на виході. Зокрема, при заданому діаметрі вхідної зіниці (4 мм) тангенс цього кута становив - 0,125 [58].

Оцінна функція генерувалася для мінімізації середньоквадратичних значень радіусів точкових діаграм з пошуком найкращих марок скла з каталогів SCHOTT і CDGM та урахуванням обмежень на конструктивні параметри та тета-дисторсію. Додатково були встановлені складові для зменшення хроматизму збільшення на краю поля зору. Ці складові по суті зводилися до мінімізації відхилень поперечних координат головних променів в площині зображень для різних довжин хвиль [58].

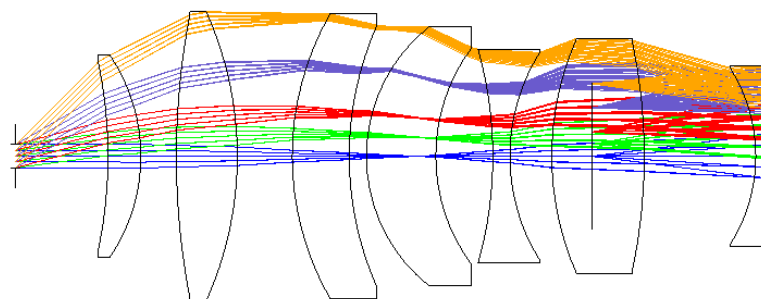
Таблиця 3.2

Лінійні розміри світлових плям розсіювання та максимальне значення дисторсії

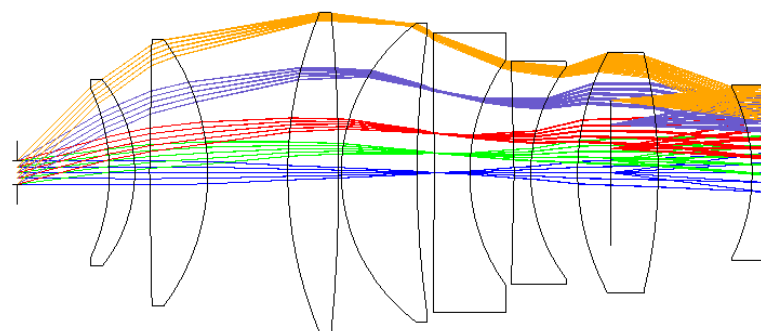
Варіант оптичної системи	Максимальне значення середньоквадратичного радіусу світлової плями у всьому спектральному діапазоні, мкм		Максимальне по модулю значення відносної F–тета дисторсії для основної довжини хвилі, %
	на оптичній осі	по всьому полю зору	
Семилінзовий	3,4	9,3	0,51
Восьмилінзовий	2,4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

Як видно з табл. 3.2, отримані числові значення відносної тета-дисторсії дещо перевищили задане обмеження 0,5%. Це зумовлено невеликим значенням вагового коефіцієнта елемента оцінної функції, який застосовувався для обмеження максимального значення дисторсії в чотирьох точках поля зору (зокрема, для відносних координат поля зору: 0,5; 0,7; 0,88 і 1).

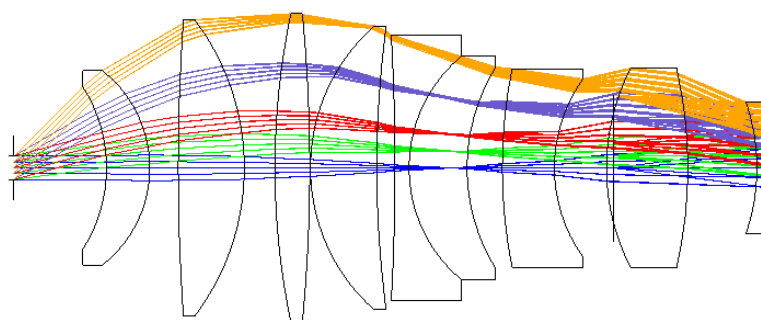
Оптичні схеми серії окулярів, знайдені як оптимальні розв'язки, показані на рис. 3.12.



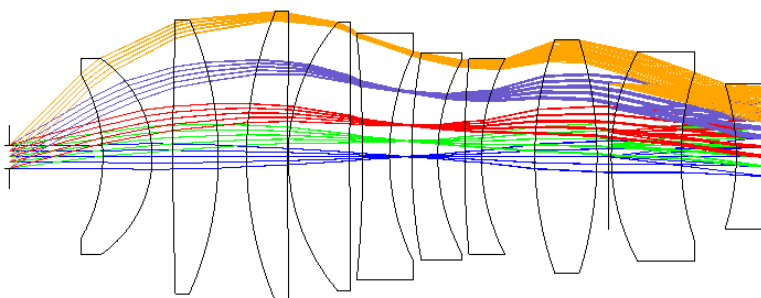
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.12 – Оптичні схеми синтезованих ширококутних окулярів з ходом осьових та позаосьових пучків променів (показано в зворотному ході променів):

- а) – семилінзового; б) – восьмилінзового;
в) – дев'ятилінзового; г) – десятилінзового [58]

Далі буде розглянуто більш детально результати синтезу лише дев'ятилінзового окуляра. Його конструктивні параметри наведено нижче, в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Конструктивні параметри дев'ятилінзового окуляра

Номер поверхні	Радіус кривизни поверхні, мм	Осьова товщина, мм	Середовище	Світловий радіус, мм
Предмет	∞	∞	—	—
1 (Апертурна діафрагма)	∞	16	—	2
2	-25,924	7,452	H-LAK52	13,94
3	-21,171	4,879	—	16,71
4	362,658	11,406	H-ZPK5	24,86
5	-42,172	5,241	—	25,46
6	129,617	6,006	H-LAK53A	26,50
7	-275,767	0,101	—	26,40
8	32,581	11,409	D-ZPK1A	24,32
9	185,934	3,123	—	23,48
10	-411,386	2,417	ZF3	22,84
11	25,000	9,993	H-LAK52	19,19
12	32,892	6,052	—	17,34
13	86,621	8,980	D-ZPK1A	17,04
14	26,274	8,953	—	15,31
15	37,418	13,999	H-ZF71	17,18
16	-75,923	11,887	—	16,29
17	-35,101	2,105	H-SF2	11,34
18	81,740	-26,747	—	10,92
Зображення	∞	0	—	12,55

Якість зображення можна оцінити за точковими діаграмами, що представлені на рис. 3.13, графіками поліхроматичних модуляційних передавальних функцій для різних точок поля зору, що представлені на рис. 3.14, та графіком тета-дисторсії, що представлений на рис. 3.15. Додатково, на рис. 3.16, представлені точкові діаграми з дефокусуванням.

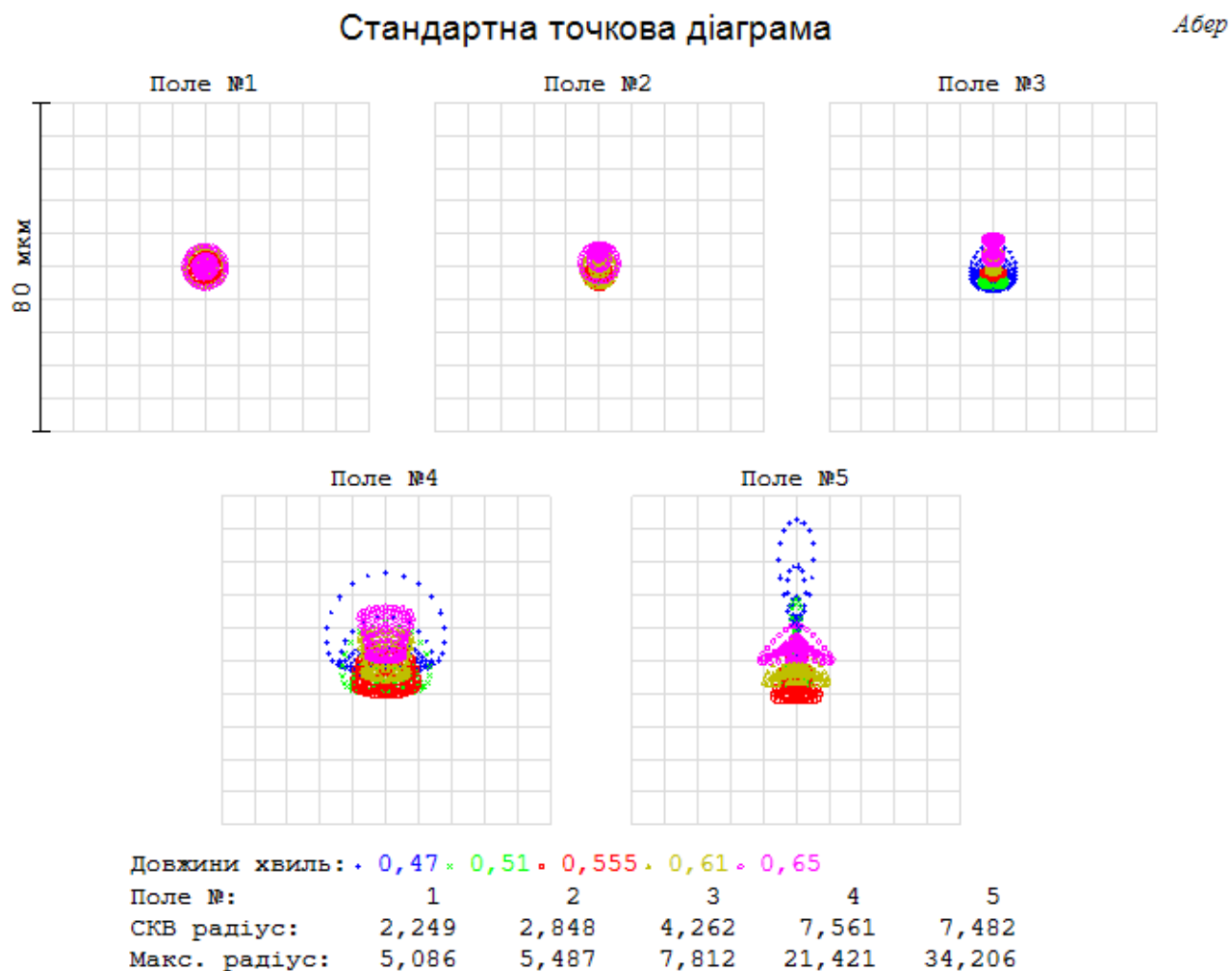


Рисунок 3.13 – Точкові діаграми синтезованого окуляра

Як видно з рис. 3.13, максимальне значення середньоквадратичних радіусів світлових плям в поліхроматичному світлі не перевищує 35 мкм.

Графіки дифракційних поліхроматичних модуляційних передавальних функцій, представлені на рис. 3.14, свідчать про досягнутий ступінь корекції аберацій та високу якість зображення отриманих оптичних систем.

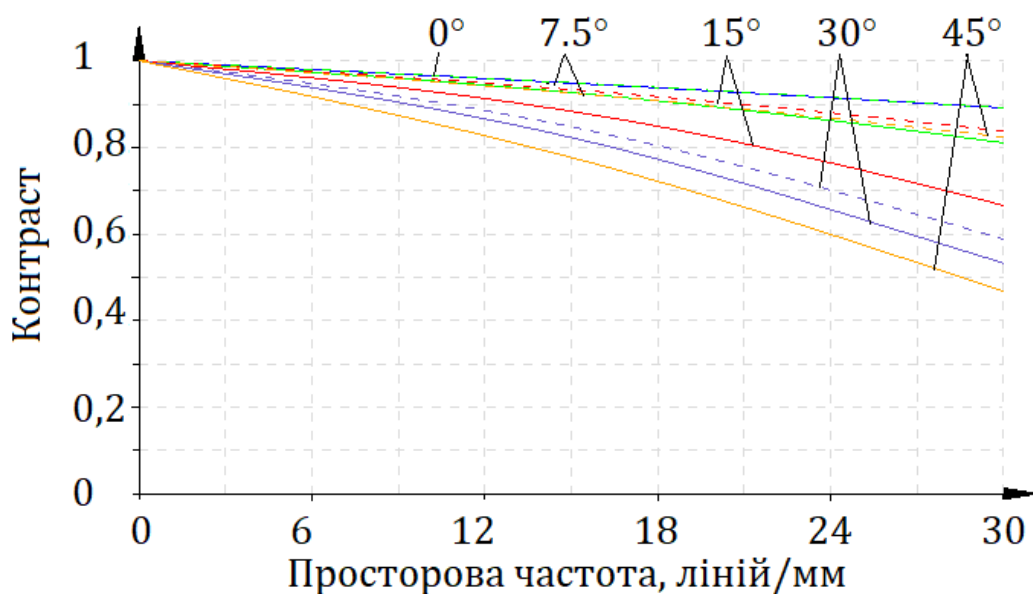


Рисунок 3.14 – Графіки поліхроматичних модуляційних передавальних функцій синтезованого окуляра для різних точок поля зору;
суцільні криві – для меридіональної площини; пунктирні – для сагітальної [58]

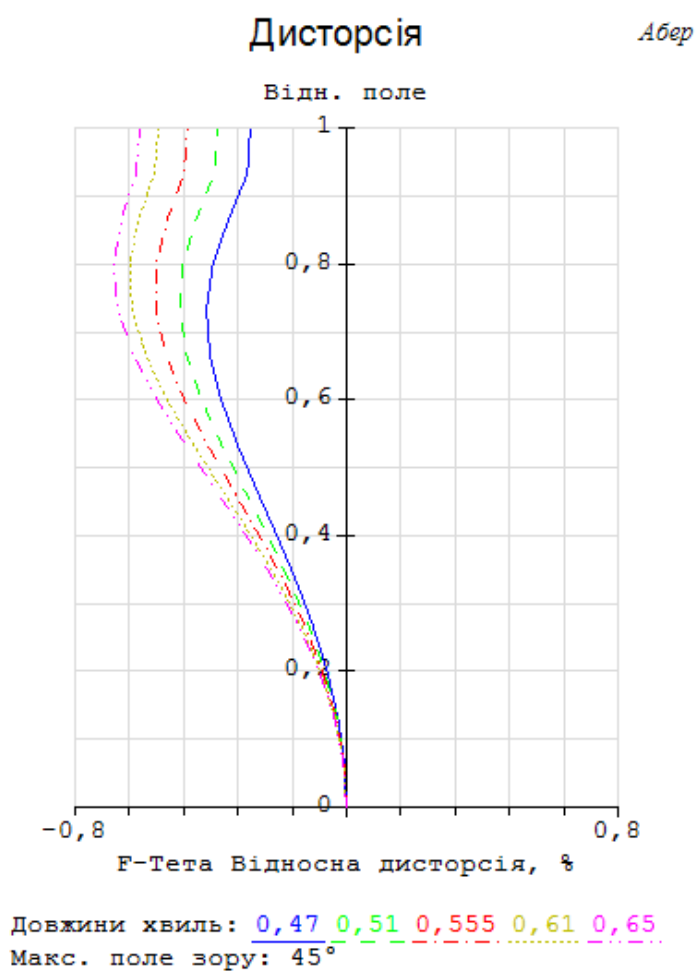


Рисунок 3.15 – Графік тета-дисторсії синтезованого окуляра

Як видно з рис. 3.15, тета-дисторсія не перевищую 1%.

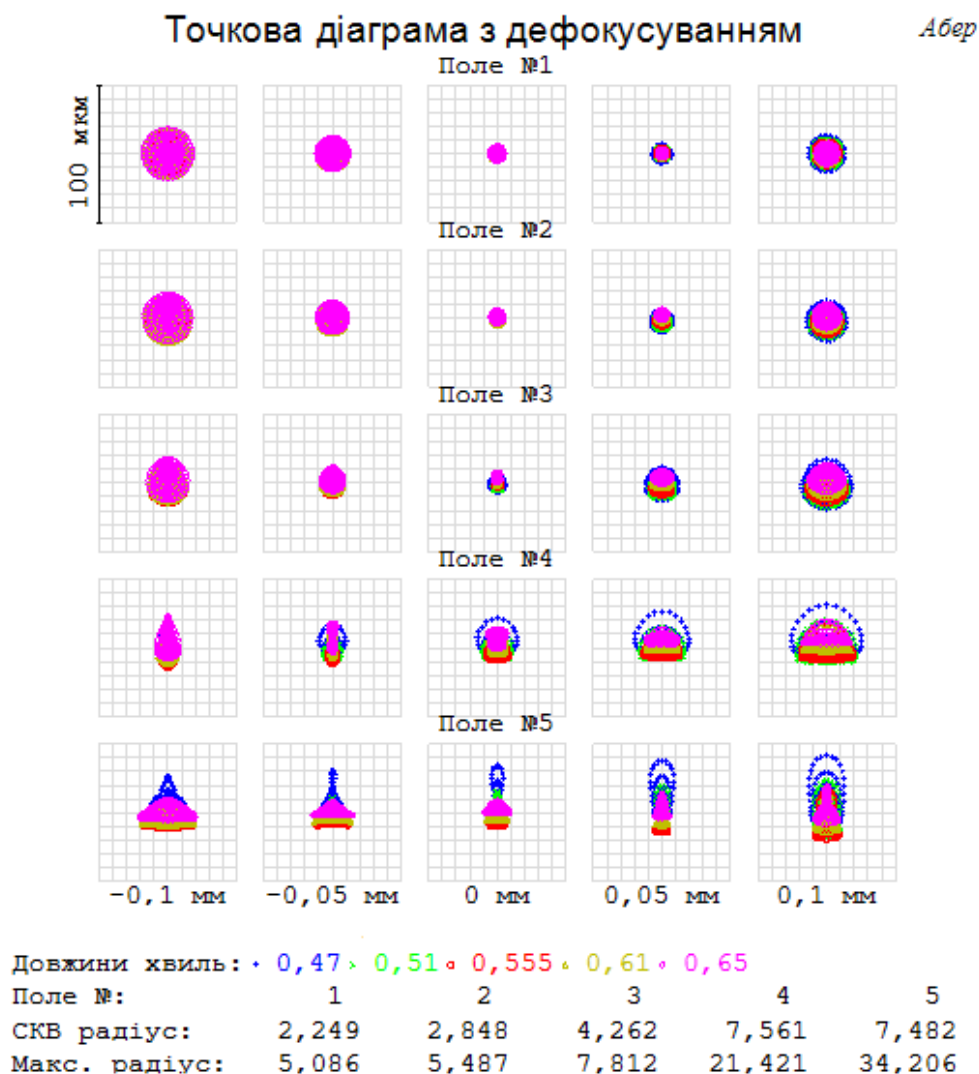


Рисунок 3.16 – Точкові діаграми з дефокусуванням оптичної системи синтезованого окуляра

3.4 Висновки до третього розділу

У даному розділі було здійснено експериментальну перевірку запропонованого автоматизованого розрахунку оптичних схем ширококутних окулярів.

Проведений параметричний та абераційний синтез оптичної системи восьмилінзового ширококутного окуляра та оптичних систем серії ширококутних окулярів, які містять сім, вісім, дев'ять та десять лінз, виправлених на тета-дисторсію, підтверджує на практиці можливість виконання автоматизованого розрахунку з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Воно значно спрощує на практиці проєктування оптичних систем з урахуванням заданих функціональних параметрів та конструктивних обмежень.

Отримані результати вказують на високу якість зображення синтезованих оптичних систем ширококутних окулярів.

Перевагами синтезованих систем є велике кутове поле зору (90°), значне віддалення зіниці (16 мм) та мале значення тета-дисторсії, що не перевищує 1% по полю.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ «DRIMUNOPTICS»

4.1 Опис ідеї проєкту

В попередньому розділі було здійснено параметричний абераційний синтез оптичних систем ширококутних окулярів для використання в телескопах та мікроскопах. В даному розділі буде наведено можливий варіант стартап-проєкту, заснованого на даних, отриманих у попередніх розділах [59].

Ідея проєкту полягає в автоматизованій розробці оптичних систем ширококутних окулярів, застосовуючи обраний алгоритм глобальної оптимізації.

На сьогоднішній день існує декілька основних методів розрахунку оптичних систем:

1) синтез, що базується на теорії аберацій оптичних систем третього порядку. Недоліком цього підходу є те, що він може дати якісні результати лише для оптичних систем з помірними значеннями відносного отвору та поля зору;

2) розрахунок з використанням елементів з відомими абераційними властивостями. Однак, цей спосіб вимагає від конструктора значного досвіду, але, навіть при цьому, він не гарантує отримання якісного чи прийнятного результату;

3) використання методів локальної оптимізації до вже розрахованих оптичних систем. Цей метод може дати якісні результати, але початкова оптична система має бути близькою до кінцевого розв'язку.

Для стартап-проєкту було вирішено синтезувати оптичну системою за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Синтезувати оптичну систему ширококутного окуляра	Астрономічна галузь	Висока якість зображення. Широке поле зору. Добре виправлена тета-дисторсія
	Мікроскопія	

Загалом, ширококутні окуляри використовуються у спеціальних приладах та мають вузько направлене застосування. Наприклад астрономічна галузь та мікроскопія.

Далі проводиться аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї в порівнянні з пропозиціями конкурентів [59]:

- визначається перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначається попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- 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) (табл. 4.2).

Як видно з табл. 4.2, сильними сторонами проекту є безкоштовне програмне забезпечення, великий кут поля зору та мале значення тета-дисторсії. Нейтральними сторонами можна вважати компактність та віддалення зіниці.

Таблиця 4.2

Визначення сильних, слабких та
нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/ п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторон а)	N (нейтр альна сторон а)	S (силь на сторо на)
		Мій проєкт	Tele Vue Optics	Celest ron	Explore Scientifi с			
1.	Вартість програмного забезпечення	Безкошт овно	>1000 \$	>1000 \$	>1000 \$			+
2.	Компактність	+	+	+	+		+	
3.	Кут поля зору	90°	82°	82°	82°			+
4.	Віддалення зіниці	16 мм	19 мм	17 мм	15 мм		+	
5.	Дисторсія	<1%	-	-	-			+

4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Даний крок служить для проведення аудиту технології, за допомогою якої можна втілити в життя ідею створення проєкту [59].

Визначення можливості технологічної здійсненності ідеї проєкту передбачає аналіз складових, що наведені нижче, в табл. 4.3 [59].

Таблиця 4.3

Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Синтез оптичної системи ширококутного окуляра	Автоматизований розрахунок	Наявні	Доступні
2.		Оцінка якості готового зображення	Наявні	Доступні

3.		Оптимізація та покращення існуючих 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.				

У разі застосування технології автоматизовано розрахунку, початкова система може бути задана у вигляді плоско-паралельних пластин, а на виході можна отримати вже якісну оптичну систему. Крім цього, такий підхід використовується для того, щоб виключити можливість впливу людського фактора на кінцевий результат. Крім цього було вирішено застосовувати технологію оцінки якості готового зображення, тобто після проходження променів через оптичну систему. Ця технологія застосовується для якісної оцінки зображення та його порівняння з іншими, аналогічними, системами конкурентів.

Після аналізу табл. 4.3, можна підбити підсумки. Технологія автоматизованого розрахунку може значно полегшити розрахунок оптичної системи, а технологія оцінки якості готового зображення, в свою чергу, дає змогу оцінити якість розрахованої системи та порівняти її з якістю систем провідних конкурентів. Крім цього, великою перевагою є те, що у запропонованому проєкті застосовується безкоштовне програмне забезпечення, в той час як конкурентами використовується платне.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

В даному підрозділі буде визначено ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проєкту, а також ринкові загрози, які можуть викликати перешкоди під час реалізації проєкту [59].

Аналіз попиту (наявність попиту, обсяг та динаміка розвитку ринку) наведений у табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	3
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	475-500 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), %	13%

Після аналізу ринку, можна зробити висновок, що потенційний ринок є досить привабливим для входження, оскільки динаміка ринку зростає, а обмежень для входу немає.

Далі буде визначено потенційні групи клієнтів та їх характеристики. Крім цього, для кожної групи клієнтів, буде сформовано орієнтовний перелік вимог до товару (табл. 4.5) [59].

Таблиця 4.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ 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	Астрономи Працівники наукових галузей	Якість, надійність, зручність.	Приваблива ціна, легкість використання.

2.	Потреба в компактному та надійному обладнанні	Працівники наукових галузей	Економічна складова, мобільність, висока точність зображення	Гарантія якості, подальший сервіс
----	---	-----------------------------	--	-----------------------------------

Як видно з табл. 4.5, основною цільовою аудиторією є астрономи 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 вже 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 загроз показав, що складність виходу на ринок, перш за все, полягає в непередбачуваній поведінці компаній-конкурентів, які вже є відомими на ринку. Крім цього на вітчизняному ринку цивільне населення має досить низький інтерес до аматорської астрономії, тому слід надавати перевагу науковій галузі, тобто сконцентруватися на вузькій категорії [59].

Наступним кроком буде проведено аналіз можливостей (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Потреба клієнтів дешевого та сучасному обладнанні	Велика кількість споживачів потребує дешевого та результативного 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 можливостей показав, що відсутність схожих компаній на вітчизняному ринку дає можливість зайняти провідні позиції для подальшого розвитку та впровадження продукції на світовий ринок. Додатково, за рахунок створення більш простого та дешевого підходу, є можливість забрати частину ринку у вже існуючих компаній [59].

Далі проводиться аналіз пропозиції.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку, наведений в табл. 4.8, показав, що наявність відомих конкурентів на світовій арені, в певній мірі, ускладнює вихід на ринок. Однак, у запропонованого проекту, завдяки більшій доступності та якості продукту, є можливість здобути першість на вітчизняному ринку, а також завоювати певний відсоток світового ринку.

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 проектування	Розробка якіснішої та доступнішої продукції
4. Товарно-видова 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

Після аналізу конкурентного ринку, наведеного в табл. 4.9, можна зробити висновок, що вихід на вітчизняний ринок майже не має перепон, однак є деякі складнощі з виходом на міжнародний ринок. проєкт повинен бути відповідати вимогам споживачів по якості та ціні, а також мати певний маркетинговий потенціал.

Таблиця 4.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Tele Vue Optics, Celestron,	Виробники окремих складових	Мають значені обсяги поставок	Торговельні знаки, прибутки,	Використання більш застарілих зразків

	Explore Scientific	оптичних систем		система інформації	
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 всіх аналізів 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 постпродажне обслуговування клієнтів

В результаті обґрунтування факторів, приведеного в табл. 4.10, можна зробити висновок, що є декілька факторів, які обумовлюють необхідність розробки проєкту, а саме: потреба споживачів у продукції, доступна ціна та постпродажне 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 табл. 4.10 та табл. 4.11 видно, що слабкою стороною проєкту є маркетинговий потенціал. Сильними факторами конкурентоспроможності можна назвати ціну продукції та простоту експлуатації [59].

Таблиця 4.12

SWOT- аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: 1. Порівняно низька ціна продукції; 2. Простота експлуатації; 3. Технічне обслуговування.	Слабкі сторони: 1. Невпізнаваність компанії; 2. Основні конкуренти мають більший ряд послуг і продукції.
Можливості: 1. Можливість здобуття лідерства на вітчизняному ринку; 2. Вихід на міжнародний ринок; 3. Удосконалення методу розрахунку.	Загрози: 1. Поява нових гравців на ринку; 2. Слабка рекламна компанія; 3. Нові розробки конкурентів.

В результаті SWOT-аналізу, наведеного в табл. 4.12, можна зробити висновок, що сильними сторонами проєкту є порівняно низька ціна, простота експлуатації та технічне обслуговування. До слабких сторін проєкту можна віднести початкову невідомість компанії та більш широкий спектр послуг та продукції у компаній-конкурентів. Ринкові можливості та загрози є наслідками впливу факторів та мають певну ймовірність здійснення. Основними можливостями є можливість здобуття

лідерства на вітчизняному ринку, подальший вихід на міжнародний ринок та удосконалення методу розрахунку. До загроз можна віднести появу нових компаній-конкурентів, слабку рекламну компанію та потенційні нові розробки компаній-конкурентів [59].

Таблиця 4.1

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 установах 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 товарів	70%	3-8 міс.

На основі SWOT-аналізу, було розроблено альтернативи ринкової поведінки, наведені в табл. 4.13, для виведення стартап-проєкту на ринок, а також орієнтовний час їх реалізації. З усіх альтернатив було обрано розширення групи товарів, оскільки ймовірність отримання ресурсів є найбільшою.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів [59].

Таблиця 4.14

Вибір цільових груп потенційних 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.	Астрономи	Готові	200 копій	Середня	Середня
2.	Наукова галузь	Готові	300 копій	Середня	Середня
3.	Інженери різних напрямків	Готові	100 копій	Середня	Середня
Які цільові групи обрано: Наукова галузь.					

В результаті вибору цільових груп потенційних споживачів, наведеного в табл. 4.14, можна зробити висновок, що наукова галузь є найбільш перспективною. Однак, компанія також буде поширювати свою продукцію і в інших галузях, таких як астрономія та інженерія. Оскільки компанія буде працювати з декількома сегментами, було обрано стратегію диференційованого маркетингу.

В результаті визначення базової стратегії розвитку, наведеного в табл. 4.15, було прийнято рішення дотримуватися стратегії диференціації, оскільки продукція буде знаходити використання у декількох галузях. Обрана стратегія є найдоцільнішою, тому що вона знижує ступінь замінності товару по відношенню до прямих конкурентів, а також зменшує чутливість до ціни, чим збільшує рентабельність [59].

Таблиця 4.2

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

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки.

Таблиця 4.3

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Ні, оскільки конкуренти мають схожий підхід	Компанія буде забирати існуючих користувачів та залучати нових	Так, оскільки оптимізаційна модель в усіх компаній схожа	Стратегія позиціонування

Після визначення базової стратегії конкурентної поведінки, наведеного в табл. 4.16, було прийнято рішення обрати стратегію позиціонування. Компанія показує чим продукт відрізняється від конкурентів, його унікальність, яку користь приносить

споживачу, а саме відбувається позиціонування на особливостях технології, що є важливим для споживачів.

Таблиця 4.4

Визначення стратегії позиціонування

№ 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 позиціонування, наведеного в табл. 4.17, можна зробити висновок, що основними вимогами цільової аудиторії до товару є висока якість, низька ціна та простота. Ключові конкурентоспроможні позиції надають можливість виконати ці вимоги.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Першим кроком маркетингової програми є розробка маркетингової концепції товару, наведена в табл. 4.18 [59].

Таблиця 4.5

Визначення ключових переваг концепції
потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Якісні оптичні системи окулярів для телескопів та мікроскопів	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

Формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач, показало, що споживачі, у яких буде впроваджено даний стартап-проект, будуть задовольнятися потреби.

Таблиця 4.6

Опис трьох рівнів моделі товару

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

Опис трьох рівнів моделі товару, наведений в табл. 4.19, дає можливість досить чітко представити продукт. Перевагами продукту є висока якість зображення, простота використання, технічне обслуговування та доступна ціна [59].

Таблиця 4.20

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	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	\$200-500

Після аналізу рівня цін на продукцію компаній-конкурентів та рівня доходів цільової групи споживачів, було визначено межі встановлення ціни, наведені в табл. 4.20. Оптимальною нижньою межею є \$200, а верхньою межею \$600. Встановлені межі дають перевагу перед продукцією компаній-конкурентів.

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 безпосередньо споживачу (канал нульового рівня)	Збут продукції відбувається через сайт компанії розробника

Як видно з табл. 4.21, зазначені функції збуту та глибина каналу формують оптимальну систему збуту, яка відбуватиметься безпосередньо через сайт компанії

розробника. Завдяки цьому можна досить просто встановлювати контакти зі споживачами та здійснювати їх подальшу підтримку.

Таблиця 4.22

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	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 позиціонування для залучення нових клієнтів	"Доступна ціна та висока якість у кожному продукті"

Оскільки 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 табл. 4.22. Основною метою рекламного повідомлення є позиціонування продукції та зацікавлення нових споживачів [59].

4.6 Висновки до четвертого розділу

Після проведеного аналізу стартап-проєкту можна підвести підсумки та зробити певні висновки.

Попит на продукцію є, що підтверджується позитивною динамікою ринку та потребою споживачів у якісних приладах для використання їх у телескопах та мікроскопах.

Вихід на світовий ринок є дещо ускладненим, оскільки на сьогоднішній день існує декілька відомих міжнародних компаній, які також займаються проєктуванням оптичних систем та мають схожі розробки.

Конкуренція на вітчизняному ринку у даній сфері є порівняно малою, що сприяє легкому виходу на ринок України.

Цільовою аудиторією є астрономічна та наукова галузь.

У якості альтернативи впровадження проєкту, доцільно розширити групи продукції, щоб задовольнити потреби більшої кількості різних споживачів.

Перевагою запропонованого підходу є висока якість зображення, простота та низька ціна. Крім цього споживачам, після покупки, буде надана гарантія на товар та технічна підтримка. Проєкт буде захищено від копіювання патентом на корисну модель та комерційною таємницею.

Оскільки цільова аудиторія дізнається про нові товари переважно за допомогою мережі інтернет, профільних сайтів та спеціальних видань, було вирішено, що найбільш доцільним шляхом розповсюдження продукції є офіційний сайт розробника, на якому також можна реалізувати технічну підтримку користувачів.

Здійснення запропонованого проєкту є доцільним, оскільки технології та проєкти в області розроблення окулярів розвиваються і ще будуть популярними у майбутньому.

ВИСНОВКИ

1. У даній роботі запропоновано використовувати один з сучасних алгоритмів глобальної оптимізації для автоматизації процедури проєктування оптичних систем ширококутних окулярів.

2. Ширококутні окуляри, зазвичай, мають спеціальне використання, а саме у астрономії, мікроскопії та інженерії. Їх головними перевагами є великий кут поля зору, що дозволяє спостерігачу бачити значно більше деталей без необхідності зміщення приладу. Запропонований метод дозволяє покращити вихідне зображення, зменшити габарити оптичної системи, а також значно спростити процес синтезу.

3. В результаті огляду найпоширеніших методів як локальної, так і глобальної оптимізації, було встановлено, що адаптивний метод диференційної еволюції Коші забезпечує високі показники щодо швидкодії та відсотку знайдених розв'язків.

4. Використовуючи програмне забезпечення «PODIL» з проєктування оптичних систем, в автоматизованому режимі було виконано експериментальну перевірку дієздатності запропонованого підходу на прикладах розрахунку п'яти оптичних систем ширококутних окулярів з кутом поля зору 90° та кількістю лінз від семи до десяти. Підтверджено, що адаптивний метод диференційної еволюції Коші є потужним засобом, завдяки якому можна проводити параметричний синтез оптичних систем ширококутних окулярів для телескопів та мікроскопів з високою якістю зображення та параметрами, що задовольнятимуть сучасним вимогам.

Розраховані системи, виправлені на класичну та тета-дисторсію, характеризуються високою якістю зображення.

5. Під час розробки стартап-проєкту було виявлено що:

- попит на продукцію є, що підтверджується позитивною динамікою ринку та потребою споживачів у якісних приладах для використання їх у телескопах та мікроскопах;

- конкуренція на вітчизняному ринку у даній сфері є порівняно малою, що сприяє легкому виходу на ринок України;

- цільовою аудиторією є астрономічна та наукова галузь.

Здійснення запропонованого проєкту є доцільним, оскільки технології та проєкти в області розроблення різноманітних окулярів розвиваються і ще будуть популярними у майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Окуляр [Електронний ресурс] // Википедия – свободная энциклопедия – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Окуляр>
- [2] Оптика. Геометрическая оптика. Оптические приборы для визуальных наблюдений [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://physics.ru/courses/op25part2/content/chapter3/section/paragraph5/theory.html#.Y1upxKtByUm>
- [3] Окуляр [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://www.astrotime.ru/okular.html>
- [4] Как выбрать окуляр [Електронний ресурс] – Режим доступа: https://astroscope.com.ua/vybor_okulyarov/29323.htm
- [5] Кучеренко О. К., Розрахунок і конструювання оптичних приладів. Частина 1. «Принципи конструювання і точність оптичних приладів» [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/24398>
- [6] Чиж І. Г., Теорія оптичних систем. Підручник [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46029>
- [7] Tele Vue Nagler Type-4 17mm Eyepiece (2") [Електронний ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/329433-REG/Tele_Vue_EN4_17_0_Nagler_Type_4_17mm.html
- [8] Tele Vue Nagler Type-5 31mm Eyepiece (2") [Електронний ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/329423-REG/Tele_Vue_EN5_31_0_Nagler_Type_5_31mm.html
- [9] Tele Vue Nagler Type-6 13mm Eyepiece (1.25") [Електронний ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/329437-REG/Tele_Vue_EN6_13_0_Nagler_Type_6_13mm.html
- [10] Explore Scientific 82° Series 30mm Eyepiece (2") [Електронний ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1046122-REG/explore_scientific_epwp8230_01_30mm_argon_purged_waterproof_eyepiece.html

[11] Explore Scientific 82° Series 30mm Waterproof Eyepiece [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://explorescientificusa.com/products/82-30mm>

[12] Explore Scientific 82° Series 14mm Eyepiece (1.25") [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1046119-REG/explore_scientific_epwp8214_01_14mm_argon_purged_waterproof_eyepiece.html

[13] Explore Scientific 82° Series 14mm Waterproof Eyepiece [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://explorescientificusa.com/products/82-14mm>

[14] Explore Scientific 82° Series 8.5mm Eyepiece (1.25") [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1504231-REG/explore_scientific_epwp8285le_01_82_series_8_5mm_eyepiece.html

[15] Explore Scientific 8.5mm 82° Series LER Waterproof Eyepiece - EPWP8285LE-01 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://explorescientificusa.com/products/82-8-5mm>

[16] Celestron Luminos 15mm Eyepiece (1.25") [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/818708-REG/Celestron_93432_Luminos_15_mm_Eyepiece.html

[17] Luminos 15mm eyepiece - 1.25" [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.celestron.com/products/luminos-15mm-eyepiece-125in?_pos=7&_sid=02d7f5165&_ss=r#description

[18] Celestron Luminos 23mm Eyepiece (2") [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/818712-REG/Celestron_93434_Luminos_23_mm_Eyepiece.html

[19] Luminos 23mm eyepiece - 2" [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.celestron.com/products/luminos-23mm-eyepiece-2in?_pos=11&_sid=02d7f5165&_ss=r#description

[20] Celestron Luminos 31mm Eyepiece (2") [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.bhphotovideo.com/c/product/844515-REG/Celestron_93435_Luminos_31mm_Eyepiece.html

[21] Luminos 31mm eyepiece - 2" [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.celestron.com/products/luminos-31mm-eyepiece-2in?_pos=8&_sid=02d7f5165&_ss=r

22. Тростянська О. В. Оптичні системи окулярів для мікродисплеїв : магістерська дис. : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Тростянська Оксана Василівна. - Київ, 2019. - 76 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30431>

[23] Задачі оптимізації і дослідження операцій [Електронний ресурс] – Режим доступу : http://www.d-learn.pu.if.ua/data/users/9653/Lecture_1.pdf

[24] Локальний пошук (оптимізація) [Електронний ресурс] // Вікіпедія – вільна енциклопедія. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Локальний_пошук_\(оптимізація\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Локальний_пошук_(оптимізація))

[25] Муляревич О. Імплементация методів локальної оптимізації у комп'ютерній системі для розв'язання динамічної задачі комівояжера з використанням моделі ройової поведінки агентів / О. Муляревич, В. Голембо // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2013. – №771 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 245–252. – Бібліографія: 12 назв.

[26] Иванов А. В. Компьютерные методы оптимизации оптических систем. Учебное пособие / Иванов А. В. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2010. – 114 с

[27] Рыков С.В., Рыков С.А., Кудрявцева И.В., Старков А.С., Свердлов А.В., Методы оптимизации в примерах в пакете MATHCAD 15. Часть VI (Численный метод безусловной оптимизации нулевого порядка. Метод случайного поиска с возвратом при неудачном шаге)– СПб: Университет ИТМО, 2020. – 105 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2617.pdf>

[28] Метод поиска по симплексу [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://mydocx.ru/1-80839.html>

[29] Метод покоординатного спуска [Електронний ресурс] Учебные материалы для студентов. – Режим доступу: https://studme.org/183587/matematika_himiya_fizik/metod_pokoordinatnogo_spuska

[30] Многомерная локальная безусловная оптимизация. Детерминированные прямые методы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/1676117/>

[31] Кононюк А. Е. Основы теории оптимизации. Книга 2. Безусловная оптимизация. Часть 1. Киев: "Освіта України", 2011. – 544 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ecat.diit.edu.ua/ft/Optimization2_1.pdf

[32] Метод сопряжённых градиентов – математический аппарат [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://basegroup.ru/community/articles/conjugate>

[33] Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт "Гradientні методи пошуку екстремуму" [Электронный ресурс] – Режим доступа: [atep.kpi.ua > doc > gradien_tni_metodi_poshuku_ekstremumu_1335430764](http://atep.kpi.ua/doc/gradien_tni_metodi_poshuku_ekstremumu_1335430764)

[34] Лыткина Л. И. Методы оптимизации с программами в системе Mathcad Учебное пособие / Лыткина Л. И. САА. – Красноярск, 2001. – с. 88. ISBN 5–86433–131–7

[35] Метод наименьших квадратов [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/zhukov_n_n/МС_5–6.pdf

[36] Родионов С. А., Гутман Е. И. Оптимизация нелинейных систем [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://aco.ifmo.ru/upload/publications/rsa_1975_01.pdf

[37] Специальные разделы прикладной оптики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://lib.ssga.ru/fulltext/УМК/Сивцов.спец.раздел.прикладной оптики>

[38] Безгачев Ф.В., методы глобальной оптимизации на основе различных подходов оптимизации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-globalnoy-optimizatsii-na-osnove-razlichnyh-podhodov-optimizatsii/viewer>

[39] Крутман С. А. методы глобальной оптимизации оптических систем/Крутман С. А., Поспехов В. Г. // Вестник МГТУ им. Баумана Н. Э. Сер. “Приборостроение”. 2012. № 1. ISSN 0236–3933

[40] Сокурєнко В. М., Неділюк В. С. Розробка оптичних систем засобами глобальної оптимізації. // Сборник научных трудов SWorld. – Выпуск 2. Том 5. – Одесса: Куприєнко, 2013. – ЦИТ: 213–247. – С. 48–52.

[41] Метод ветвей и границ. Задача коммивояжера [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://kvckr.me/DM/DM28.html>

[42] Динамическое программирование [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ppt-online.org/263764>

[43] Генетический алгоритм [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://wp.wiki-wiki.ru/wp/index.php/Генетический_алгоритм

[44] Эволюционное программирование и Эволюционные алгоритмы, эволюционные вычисления, пример генетического алгоритма [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://intellect.icu/evolyutsionnoe-programmirovaniye-i-evolyutsionnye-algoritmy-evolyutsionnye-vychisleniya-primer-geneticheskogo-algoritma-108>

[45] Теоретические основы метода дифференциальной эволюции [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://neuronus.com/theory/em/32-teoreticheskie-osnovy-metoda-differentsialnoj-evolyutsii.html>

[46] Сокурєнко 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.

[47] Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. The Scientific World Journal, Vol. 2013, 2013. 12 pages

[48] Смажко, І. О. Оптичні системи об'єктивів для короткохвильового інфрачервоного випромінювання : магістерська дис. : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Смажко Іван Олександрович. - Київ, 2019. - 89 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30433>

[49] Алгоритм роя частиц. Описание и реализация на языках Python и C# [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://jenyay.net/Programming/ParticleSwarm>

[50] Сагун А. В., Хайдуров В. В., Кунченко-Харченко В. И. Метод стаи волков и его модификация для решения задачи поиска оптимального пути // Фізико-

математична освіта: науковий журнал. – 2017. – Випуск 2(12).– С. 135–139.
[Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-stai-volkov-i-ego-modifikatsiya-dlya-resheniya-zadachi-poiska-optimalnogo-puti/viewer>

[51] Частикова В. А., Воля Я. И., анализ эффективности работы алгоритма светлячков в задачах глобальной оптимизации // Научные труды КубГТУ, №15, 2016 гож, с. 105–111 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0036/1294.pdf>

[52] Газизов Т. Т. Методы глобальной оптимизации Учебное пособие/ Газизов Т. Т. – Томск: В-Спектр, 2017. – 24 с. ISBN 978–5–91191–375–5

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

[54] Стохастическое туннелирование [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ru.upwiki.one/wiki/Stochastic_tunneling

[55] Метод отжига [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ru.algorithmica.org/cs/combinatorial-optimization/annealing/>

[56] Газизов Т. Т. Методы глобальной оптимизации: учебное пособие. – Томск: В-Спектр, 2017. – 24 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://talgat.org/news/wp-content/uploads/2018/08/112.pdf>

[57] Крижній А. І., Сокурєнко В. М. Автоматизований розрахунок ширококутного 8 лінзового окуляра з полем зору 90° // 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. 57-60.

[58] Сокурєнко В. М. Автоматизований параметричний синтез ширококутних окулярів з полем зору 90° / В. М. Сокурєнко, А. І. Крижній // Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки. – Хмельницький, 2022. – Прийнято редакцією до друку 31.10.2022

[59] Гавриш, Олег Анатолійович, et al. «Розроблення стартап-проекту.» (2016).