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

Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Бурау Н.І.
«___»_____2026__ р

Дипломна робота

На здобуття ступені бакалавра
За освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»
Спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
На тему: «Автоматизований зум-монокуляр»

Виконав:
Студент IV курсу, групи ПО-21 _____
Мінов Д. Д.

Керівник:
Професор, д.т.н. проф. _____
Чиж Ігор Генріхович

Рецензент: _____
Доцент, к.т.н., доцент
Безугла Н.В.

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень праць
інших авторів без відповідних посилань
Студент Мінов Д.Д.

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІОНС

_____Надія БУРАУ

«___»_____2026_р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студента

Мінова Данили Дмитровича

1. Тема дипломної роботи "Автоматизований зум-монокуляр" затверджена наказом по університету від «__»_____2026_ р. №__

2. Термін подання студентом дипломної роботи: 10. 06.2026 р.

3. Вихідні дані до дипломної роботи:

1. Зум-монокуляр повинен складатися із зум-афокальної системи і монокуляра з фіксованим кутовим збільшенням.
2. Довжина монокуляра $L = 100$ мм
3. Кутове збільшення монокуляра 4^x, кутове збільшення зум-афокальної системи $[1\text{-}\ 3]^x$, кутове збільшення зум-монокуляра $[4\ \text{-}\ 12]^x$.
4. Кут поля зору зум-монокуляра при $\gamma = 4\ \ 2\omega = 10^o$.
6. Діаметр вихідної зіниці – 3 мм при кутовому збільшенні зум-монокуляра 4^x
7. Мінімальна відстань від окуляра до вихідної зіниці $t' = 8$ мм.
7. Загальний осьовий габарит зум-монокуляра – не більше 320 мм.
8. Обертальна система монокуляра – призма Шмідта.
9. Варіо-лінзи зум-афокальної системи – швейцарської компанії Optotun

4. Зміст пояснювальної записки:

РОЗДІЛ 1. Аналіз сучасного стану та методів побудови оптичних систем

зі змінним збільшенням

1.1.Огляд оптичних схем монокулярів з призмовими обертальними системами.

1.2 Огляд оптичних схем зум-афокальних насадок до монокуляра

1.3 Огляд електрично і механічно керованих адаптивних варіолінз.

РОЗДІЛ 2 Габаритний розрахунок оптичної системи монокуляра

2.1 Габаритний розрахунок оптичних компонентів системи монокуляра.

2.2 Компоновка оптичної системи монокуляра

РОЗДІЛ 3 Компоновка і аналіз оптичної системи зум-монокуляра

3.1. Компоновка зум-афокальної системи Галілея на варіо-лінзах фірми Optotune El-16-40 та ML-20-37

3.1.1 Відтворення конструктивний параметрів варіолінз на базі вихідних даних від фірми Optotune.

3.1.2 Компоновка зум-афокальної системи на варіолінзах El-16-40 та ML-20-37

3.2. Аналіз в режимі мультиконфігурації параксіальних і аберраційних параметрів і характеристик скомпонованої зум-афокальної системи.

3.3 Компоновка оптичної системи зум-монокуляра з аналізом її параксіальних параметрів і аберраційного стану

3.4. Функціональна і оптична схема зум-монокуляра

3.5 Драйвери варіолінз

5.Перелік графічного матеріалу, включеного до презентації:

5. Приклади аналогів і прототипів зум-монокулярів
6. Функціональна схема автоматизованого зум-монокуляра.
7. Оптична схема автоматизованого зум-монокуляра.
8. Графіки, що демонструють якість зображення, сформованого зум-монокуляром.

Дата видачі завдання: 26.04.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Розділ 1.	18.05.2026	
2	Розділ 2.	25.05.2026	
3	Розділ 3..	04.06.2026	
4	Презентація	15.06.2024	
5	Попередній захист	15.06.2026	

Студент Данило Мінов

Керівник проф., д.т.н. Ігор Чиж

АНОТАЦІЯ

У дипломній роботі розроблено оптичну систему автоматизованого зум-монокуляра. Основна мета полягає у забезпеченні плавного регулювання кутового збільшення в діапазоні від 4х до 12х без використання рухомих механічних деталей. Система побудована на основі зум-афокальної насадки Галілеївського типу, що реалізується за допомогою електрично та механічно керованих адаптивних варіолінз, і функціонує спільно з монокуляром, оснащеним призмовою обертальною системою Шмідта.

Зміна масштабу зображення здійснюється за допомогою варіолінз фірми Optotune (моделей EL-16-40 та ML-20-37), керування якими виконується через мікроконтролер та відповідні драйвери. Обробка вихідних даних від виробника та розрахунок конструктивних параметрів варіолінз реалізується методами поліноміальної регресії в MathCAD. Моделювання ходу променів, компоновка системи та аналіз її аберацийного стану виконано в оптичному редакторі ZEMAX у режимі мультиконфігурації, що дозволило забезпечити високу якість зображення. Робота також містить габаритні розрахунки оптичних компонентів монокуляра та редукованої розгортки призми, структурні, функціональні та оптичні схеми приладу. Розглянуто результати трасування променів, побудови спот-діаграми та аналізу параксіальних характеристик розробленої системи.

Результати роботи свідчать про доцільність впровадження адаптивної оптики (варіолінз) у приладі спостереження для створення автоматизованих компактних монокулярів нового покоління, що відрізняються високою надійністю та швидкістю фокусування.

ANOTATION

The diploma project developed an optical system of an automated zoom monocular. The main goal is to ensure smooth adjustment of angular magnification in the range from 4x to 12x without the use of moving mechanical parts. The system is built on the basis of a Galilean-type zoom-afocal attachment, which is implemented using electrically and mechanically controlled adaptive variolens, and functions together with a monocular equipped with a Schmidt prism rotation system.

Changing the image scale is carried out using variolens from Optotune (models EL-16-40 and ML-20-37), which are controlled via a microcontroller and appropriate drivers. Processing of the output data from the manufacturer and calculation of the design parameters of the variolens is implemented using polynomial regression methods in MathCAD. Modeling of the path of rays, system layout and analysis of its aberration state were performed in the ZEMAX optical editor in multi-configuration mode, which allowed to ensure high image quality. The project also includes dimensional calculations of the optical components of the monocular and the reduced prism sweep, structural, functional and optical schemes of the device. The results of ray tracing, construction of the spot diagram and analysis of the paraxial characteristics of the developed system are considered.

The results of the work indicate the feasibility of implementing adaptive optics (variolens) in the observation device to create compact monoculars of a new generation, characterized by high reliability and focusing speed.

ЗМІСТ

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМ ЗБІЛЬШЕННЯМ 9

1.1. Огляд оптичних схем монокулярів з призмовими обертальними системами. 9

1.2. Огляд оптичних схем зум-афокальних насадок до монокуляра. 13

1.2.1. Огляд зум-афокальних систем з механічним способом керування 14

1.2.2. Огляд зум-афокальних систем з використанням в них варіолінз 20

1.3. Огляд електрично і механічно керованих адаптивних варіолінз. 21

1.3.1. Мембранні варіолінзи 22

1.3.2. Варіолінзи, що працюють на ефекті електрозмочування 26

1.3.3. Мембранні варіолінзі: Серія EL та ML від Optotune та їх порівняння 31

РОЗДІЛ 2 ГАБАРИТНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНОКУЛЯРА 36

2.1. Габаритний розрахунок оптичних компонентів системи монокуляра 36

2.2 Компоновка оптичної системи 47

Висновки до Розділу 2 54

РОЗДІЛ 3 КОМПАНОВКА І АНАЛІЗ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЗУМ-МОНОКУЛЯРА 56

3.1. Компоновка зум-афокальної системи Галілея на варіо-лінзах фірми Optotune EL-16-40 та ML-20-37 56

3.1.1 Відтворення конструктивних параметрів варіолінз на базі вихідних даних від фірми Optotune 60

3.1.1 Відтворення конструктивний параметрів варіолінз на базі вихідних даних від фірми Optotune. 61

3.1.2 Компоновка зум-афокальної системи Галілея на варіо-лінзах фірми Optotune EL-16-40 та ML-20-37 70

3.2. Аналіз в режимі мультиконфігурації параксіальних і аберраційних параметрів і характеристик скомпонованої зум-афокальної системи. 74

3.3 Компоновка оптичної системи зум-монокуляра з аналізом її параксіальних параметрів і аберраційного стану 80

3.4. Функціональна і оптична схема зум-монокуляра 83

3.5 Драйвери варіолінз 84

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 88

СПИСОК ПОСИЛАНЬ 89

ДОДАТОК А 92

ДОДАТОК Б 93

ВСТУП

Сучасний розвиток систем технічного зору, приладів спостереження та засобів дистанційного моніторингу характеризується стрімким переходом до повної автоматизації процесів отримання та обробки візуальної інформації. Особливої актуальності набувають оптико-електронні системи, здатні адаптуватися до умов спостереження без участі людини, забезпечуючи при цьому високу швидкість фокусування та зміну масштабу зображення у реальному часі.

Традиційні оптичні системи зі змінним збільшенням (панкратичні системи) базуються на механічному переміщенні лінзових компонентів уздовж оптичної осі. Це потребує використання складних механічних приводів, складних напрямних позиціювання компонентів, що значною мірою збільшує габарити приладу, його масу та собівартість. Альтернативним і перспективним напрямком є впровадження адаптивної оптики – рідких варіолінз з електричним керуванням. Використання таких компонентів, дозволяє реалізувати зум-систему без жодної рухомої деталі, що є критично важливим для мобільних пристроїв та безпілотних платформ.

Метою даного дипломної роботи є розробка оптичної системи зум-монокуляра з трансфокатором Галілеївського типу на основі варіолінз, що функціонує разом з монокуляром із призмовою обертальною системою Шмідта. Пристрій повинен забезпечувати плавне регулювання кутового збільшення в діапазоні від 4х до 12х, підтримувати високу якість зображення та вписуватися у жорсткі габаритні обмеження.

У процесі реалізації проєкту розглянуто:

Сучасний стан та тенденції розвитку адаптивної оптики, зокрема принципи роботи мембранних та електрозмочуваних варіолінз.

Порівняльний аналіз телескопічних систем схем Галілея та Кеплера в контексті використання адаптивних компонентів.

Технічне завдання, функціональні вимоги та вибір компонентної бази від

компанії Optotune для реалізації автоматизованого керування

Об’єктом дослідження є автоматизація керування кутовим збільшенням система зум-монокуляра, а предметом – її оптична система, функції керування оптичними силами варіолінз та конструктивні параметри афокальної насадки.

Практична цінність розробки полягає у створенні концепції монокуляра нового покоління, який не має рухомих механічних частин. Така платформа може бути масштабована для потреб систем безпеки, військової оптики, спортивних приладів спостереження та роботизованих комплексів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМ ЗБІЛЬШЕННЯМ

1.1. Огляд оптичних схем монокулярів з призмовими обертальними системами.

Монокуляр — це різновид зорової труби Кеплера (Рис. 1.1), оснащений призмовою обертальною системою. Його призначення — формування збільшеного, чіткого та прямого зображення наземних об’єктів, зручного для спостереження людським оком. Конструктивно монокуляр складається з трьох основних частин: об’єктива, поворотної (призмової) системи та окуляра [1].

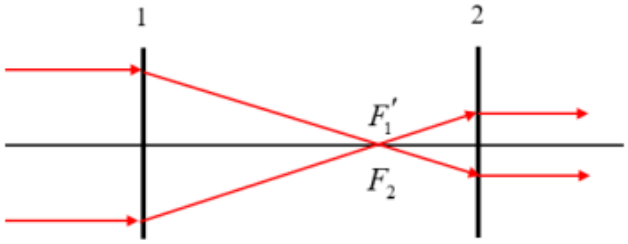


Рис. 1. 1 Хід променів в телескопічній системі Кеплера[2]

Об’єктив є першим елементом оптичної системи і слугує для утворення дійсного зображення віддалених об’єктів. Оскільки це зображення виходить перевернутим, його потрібно зробити прямим. Для цього використовується другий елемент — поворотна система, яка обертає зображення на 180° навколо оптичної осі. Така система може бути як лінзовою, так і призмовою, рис. 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 [1].

Після поворотної системи знаходиться третій елемент — окуляр. Його передня фокальна площина збігається із зображенням, сформованим попередніми елементами, яке вже є прямим. Окуляр повинен створювати зображення на нескінченності, якщо око спостерігача нормально акомодує на далекі відстані. Якщо ж у спостерігача є порушення акомодації ока (наприклад, короткозорість або далекозорість), то окуляр налаштовується так, щоб формувати зображення на відстані, що відповідає точці найкращого зору ока [2].

У монокулярах, зорових трубах і біноклях застосовують різні типи поворотних призм і призмових систем, приклади яких зазвичай наводяться у складі їхніх оптичних схем [1].

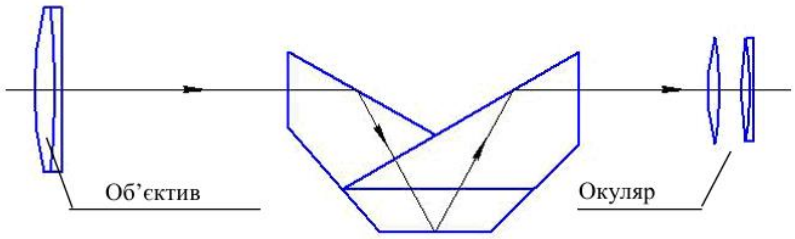


Рис. 1.1 Оптична схема монокуляра з призмою Аббе [1]

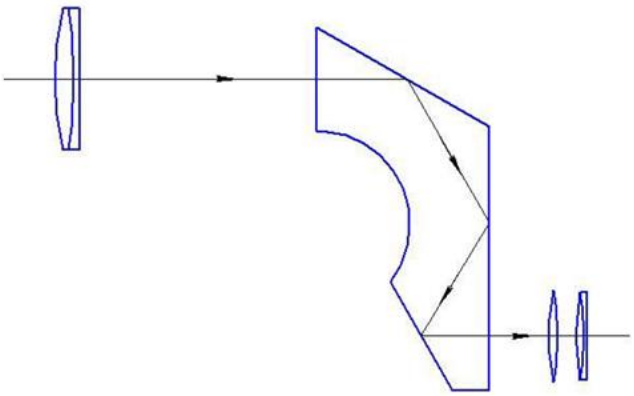


Рис. 1.3 Оптична схема монокуляра з призмою Лємана [1]

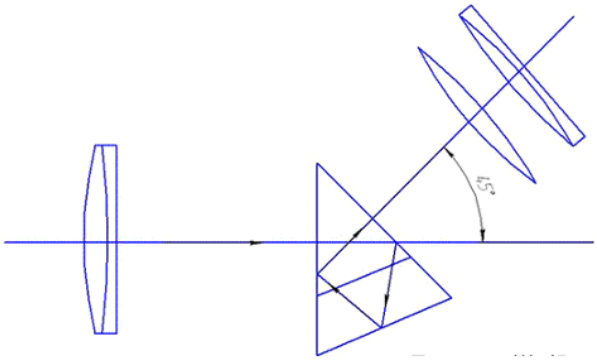


Рис. 1.4 Оптична схема монокуляра з призмою Шмідта [1]

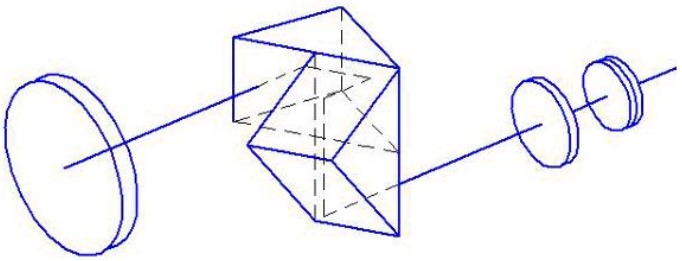


Рис. 1.5 Оптична схема монокуляра з призмою Порро - I роду [1]

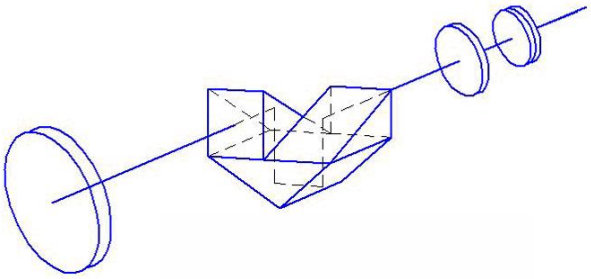


Рис. 1.6 Оптична схема монокуляра з призмою Порро - II роду [1]

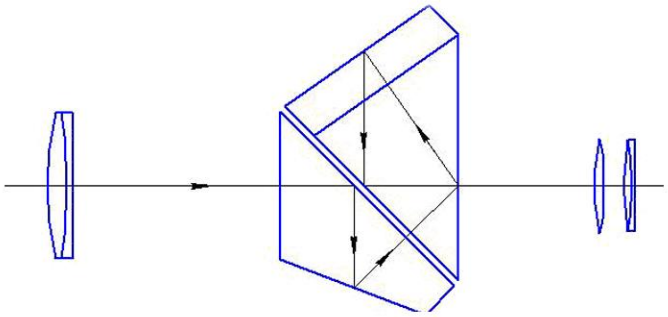


Рис. 1.7 Оптична схема монокуляра з призмою Пехана [1]

Призмова поворотна система здатна не лише обертати площину зображення, сформованого об’єктивом зорової труби, на 180°, але й забезпечувати кутовий злам або паралельне зміщення оптичної осі.[1].

Розглянувши різні типи призм, можна помітити, що кожна з них вирішує своє конкретне завдання. Наприклад, системи Порро (Рис. 1.5, 1.6) найкраще працюють у великих біноклях, бо вони розносять паралельно осі об’єктивів і роблять картинку об’ємною. Але для мого монокуляра вони невиправдено громіздкі.

Призми Аббе та Пехана (Рис. 1.2, 1.7) гарні тим, що у них осі на вході і виході суміщені. Але в моєму технічному завданні є вимога нахилу вихідної

оптичної осі для забезпечення зручності спостерігання об’єктів, що знаходяться високо над горизонтом.

Тому вибір призми Шмідта (Рис. 1.4), став найкращий для зум-монокуляра, тому що завдяки зламу осі на 45 градусів, прилад до того ж стає коротшим, що дозволяє зробити монокуляр менш габаритним та більш зручним у використанні.

Далі розглянемо оптичну схему монокуляра із дискретною зміною кутового збільшення

Нижче наведена оптична схема системи IRST, яка є монокуляром із дискретною зміною збільшення (Рис. 1.8). На відміну від панкратичних систем із плавним регулюванням, у даній конструкції зміна масштабів відбувається шляхом перемикання між двома конкретними положеннями оптичних компонентів зум-блоку [3].

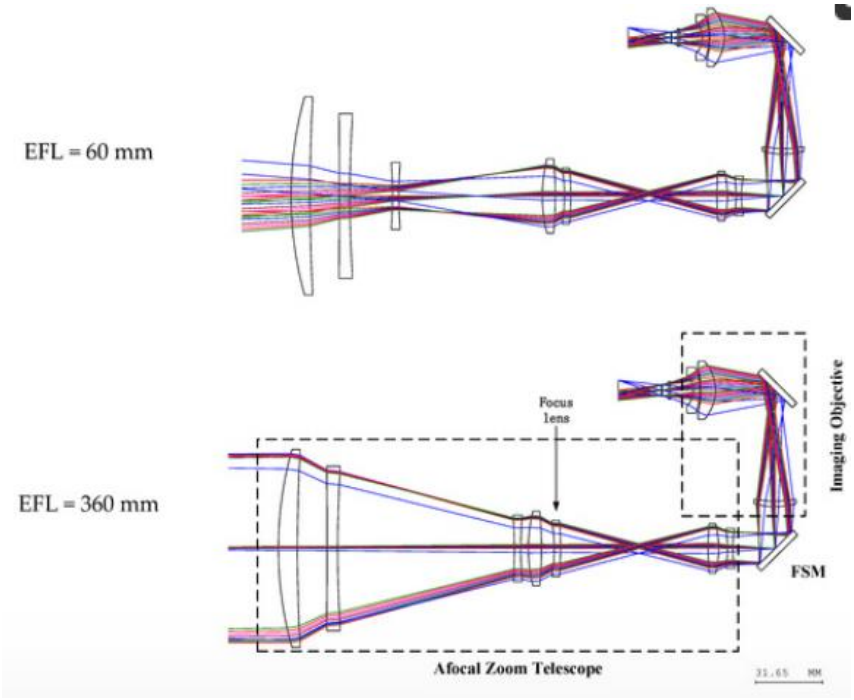


Рис. 1.8 Схема оптичної системи IRST з 6× збільшенням [3]

Такий дискретний підхід дозволяє отримати максимально чітку картинку в кожному з режимів, оскільки оптична система аберраційно коригована і розрахована на конкретні фіксовані положення, що виключає похибки фокусування, які часто виникають при плавному русі.

Зміна кутового збільшення в даній системі здійснюється дискретно (шляхом перемикання), що забезпечує стабільність оптичних характеристик приладу. У верхній частині рисунка показано режим широкого поля зору (огляд) з фокусною відстанню 60 мм., а у нижній частині рисунка показано режим вузького поля зору (детальне розпізнавання) з фокусною відстанню 360 мм. [3].

Наявність цих двох режимів робить цей монокуляр універсальним, бо за допомогою першого режиму можна швидко знайти об’єкти в широкому куті, а у другому режимі можна детально вивчити об’єкт на великій відстані.

Принцип роботи: Промені після проходження об’єктиву проходять через афокальний зум-телескоп (Afocal Zoom Telescope), який за допомогою переміщення внутрішніх лінз змінює кутове збільшення. Далі промені проходять через призмову систему, яка зламує вісь і потрапляють в окулярну частину (Imaging Objective), яка формує зображення для спостерігача [3].

Дискретне перемикання збільшення, розглянуте на прикладі системи IRST (Рис. 8), є перевіреним і надійним методом, який гарантує високу точність у кожному з положень. Однак така схема має суттєвий недолік – відсутність плавності. Користувач фактично втрачає об’єкт спостереження в момент перемикання, а неможливість встановити проміжне збільшення суттєво обмежує гнучкість використання приладу в динамічних умовах.

Крім того, класична реалізація подібних систем потребує механічних приводів для переміщення лінз. Це призводить до необхідності розширення функціонала існуючих монокулярів за допомогою додаткових пристроїв.

1.2. Огляд оптичних схем зум-афокальних насадок до монокуляра.

Зум-афокальні пристрої — це спеціалізовані телескопічні модулі, що дозволяють плавно змінювати кутове збільшення при збереженні паралельності променів в пучках на виході з них. У сучасній оптико-електронній апаратурі

найчастіше застосовується модульна архітектура, яка складається з об’єктивної групи фокусування, афокального зум-блоку та лінз фокусування зображення [2].

Така структура забезпечує максимальну гнучкість при зміні конфігурації обладнання.

1.2.1. Огляд зум-афокальних систем з механічним способом керування

На основі аналізу оптичних схем можна виділити кілька ключових типів зум-систем:

1. Трикомпонентні системи: демонструють стабільні показники фокусування та корекції сферичної аберації, проте мають обмежені можливості виправлення поперечного хроматизму. Їхня особливість - проходження рухомих елементів крізь площину зіниці [4].

Ці системи є базовою структурою для афокальних насадок. Принцип роботи у таких пристроях, де два компоненти є рухомими, дозволяє змінювати не лише кутове збільшення, а й забезпечувати нерухомість вихідної зіниці. Вони демонструють відмінні показники виправлення сферичної аберації та фокусування [5].

Головним недоліком трикомпонентних схем за Галілеєм є складність виправлення поперечного хроматизму, який залишається на нульовому рівні корекції [5].

Додатково наведені зум-афокальні системи в тонких компонентах, для кутового збільшення $\gamma = 1$ (Рис. 1.9), $\gamma > 1$ (Рис. 1.10) та загальна схема, рис. 1.11 в трьох її станах.

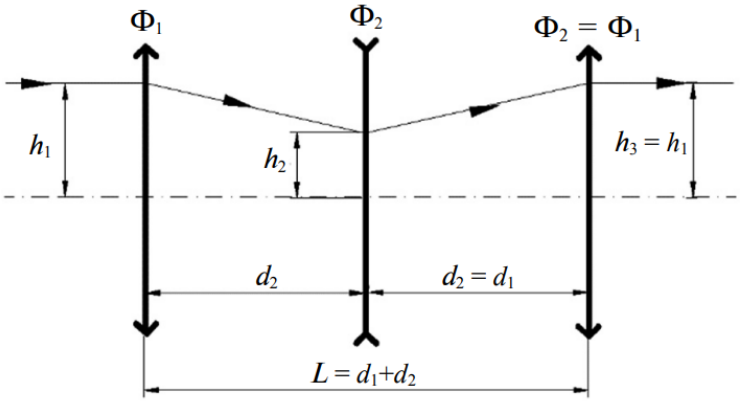


Рис. 1.9 Зум-афокальна симетрична система при кутовому збільшенні $\gamma = 1$ [5]

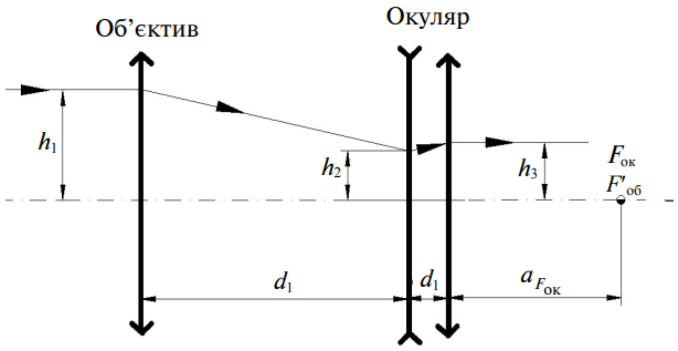


Рис. 1.10 Зум-афокальна система при кутовому збільшенні $\gamma > 1$ [5]

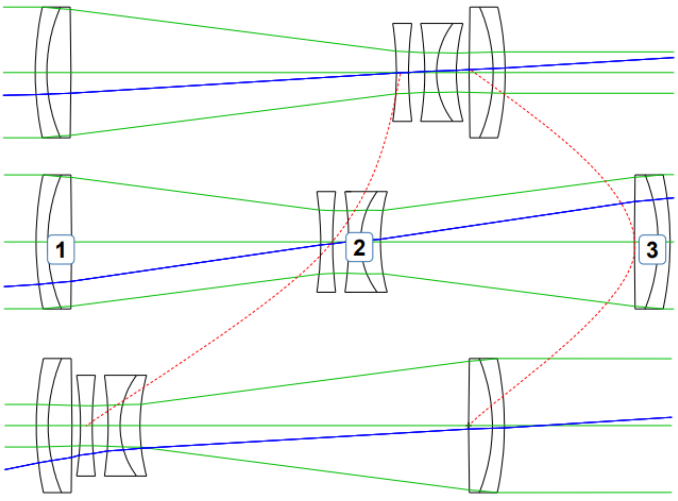


Рис. 1.11 Трикомпонентні системи [4]

2. Симетричні чотирикомпонентні модулі: вважаються еталонними за рівнем продуктивності при фіксованих габаритах. Завдяки симетричному переміщенню

внутрішніх компонентів досягається достатня корекція усіх основних аберацій [4].

Чотирикомпонентна система дозволяє реалізувати конструкцію з доступною центральною діафрагмою, що важливо для контролю світлового потоку в відеосистемах [6].

Для наочності наведені зум-афокальні системи в тонких компонентах, для кутового збільшення $\gamma = 1$ (Рис.1.12) та $\gamma \neq 1$ (Рис. 1.13), та загальну систему на 3 її стану (Рис. 1.14).

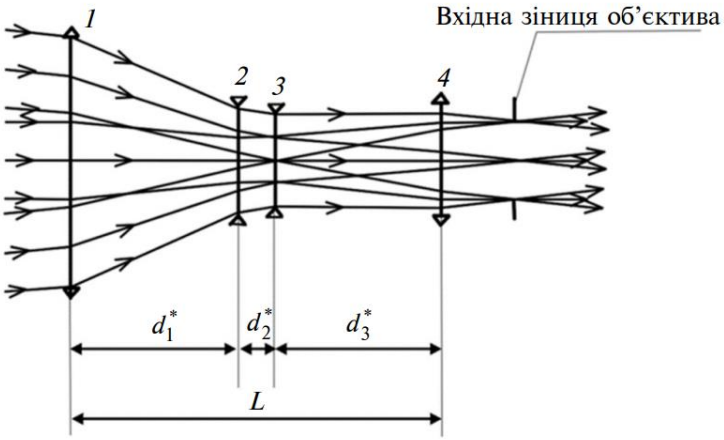


Рис. 1.12 Чотирикомпонентна зум-афокальна оптична система при кутовому збільшенні $\gamma = 1$ [6]

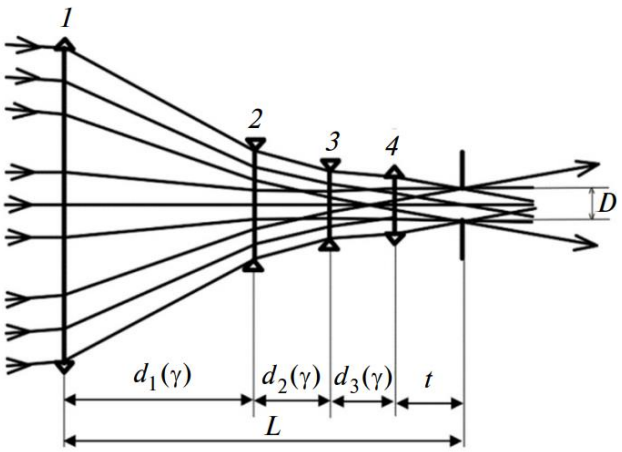


Рис. 1.13 Чотирокомпонентна зум-афокальна система при $\gamma \neq 1$ [6]

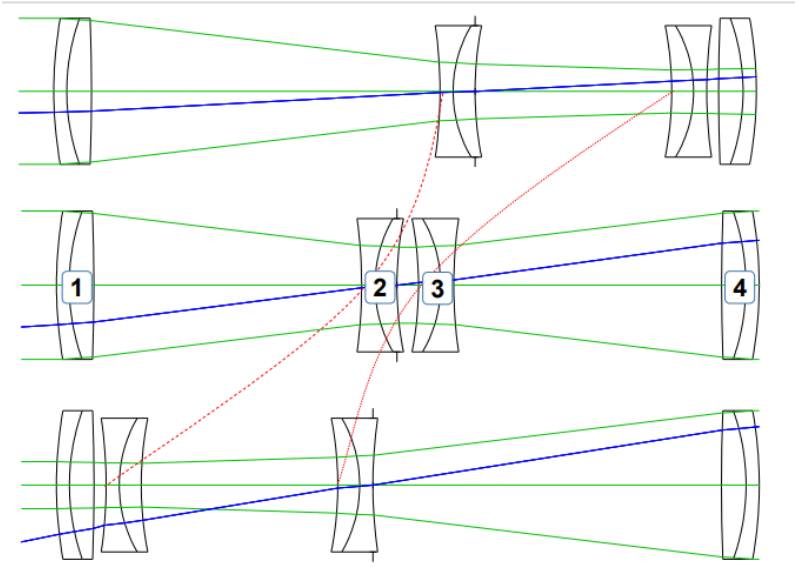


Рис. 1.14 Чотирокомпонентні симетричні системи [4]

3. Системи з відкритою діафрагмою (Рис. 1.15): модифікація, де траєкторії лінз не перетинають центральну зону, що відкриває доступ для встановлення діафрагми [4].

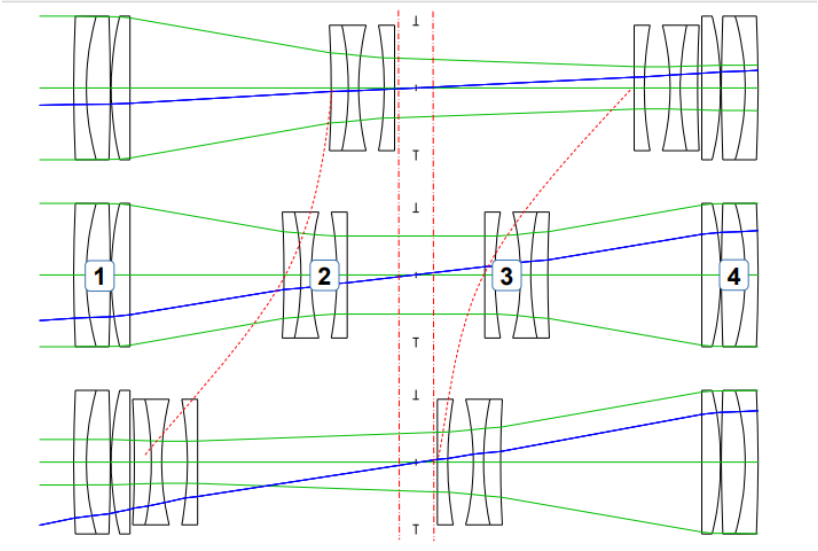


Рис. 1.15 Системи з відкритою діафрагмою [4]

4. П’ятикомпонентні системи з оптичною компенсацією (Рис. 1.16): вирізняються простотою механічного приводу завдяки жорсткому з’єднанню другого та четвертого компонентів, проте мають нижчу якість корекції аберацій порівняно з іншими типами [4].

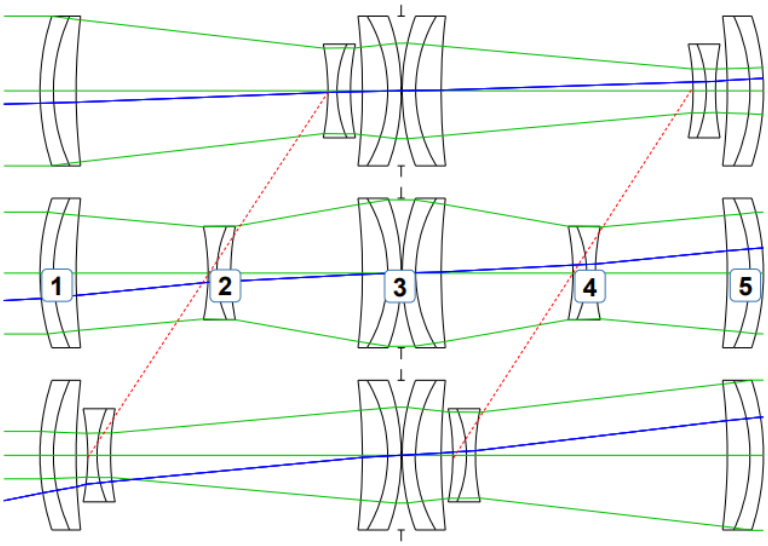


Рис. 1.16 П'ятикомпонентні схеми з оптичною компенсацією [4]

Для наочного представлення принципів зміни масштабу зображення розглянуто моделювання роботи афокальної системи (Рис. 1.17), яка забезпечує п’ятикратне збільшення (5x Zoom) [7].

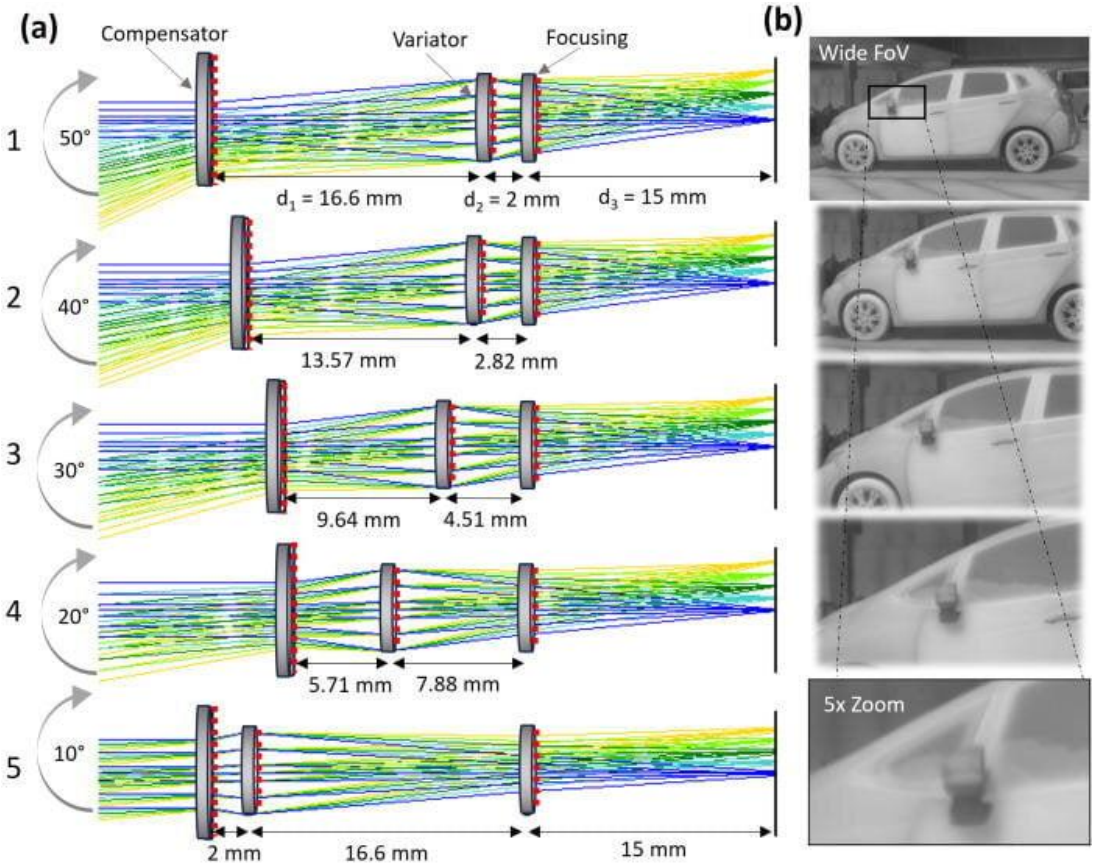


Рис. 1.17 Приклад використання 3 компонентної зум-афокальної системи [7]

На лівій частині рисунка продемонстровано хід променів для п’яти різних станів кутового збільшення (від 50^o до 10^o). Оптична система відповідає класичній модульній структурі.

З цього зображення видно 3 умовні компоненти на які поділяється ця система [7]:

1. Компенсатор – вхідний компонент, що формує первинне зображення.
2. Варіатор: центральний рухомий блок (афокальна система), що безпосередньо відповідає за зміну кутового збільшення. На схемі видно, як зміна відстаней d_1 та d_2 змінює кут нахилу вихідний променів.
3. Фокусуюча лінза: завершальний компонент, що формує чітке зображення в площині спостереження.

На правій частині рисунка показано ефект від застосування даної оптичної схеми. Початковий стан із широким кутом поля зору та мінімальним збільшенням (Wide FoV). Стан системи при мінімальному куті 10^o, що дозволяє детально розгледіти віддалений об’єкт.

Попри високу ефективність розглянутих три-, чотири- та п’ятикомпонентних зум-афокальних схем їхня практична реалізація стикається з низкою конструктивних обмежень. Основним бар’єром є необхідність фізичного переміщення лінзових компонентів для зміни кутового збільшення. Використання елементів із фіксованими оптичними силами потребує впровадження складних механічних приводів та систем керування, що неминуче призводить до збільшення габаритів, ваги та вартості самого приладу.

У сучасних розробках розв’язанням цієї проблеми стає перехід до систем на основі варіолінз. Принципова відмінність такого підходу полягає в тому, що зміна параметрів системи відбувається без механічного зміщення – компоненти залишаються нерухомими, а їхня оптична сила регулюється електричним сигналом. Завдяки наявності спеціалізованих драйверів та програмного

забезпечення, такі зум-системи легко інтегруються з комп'ютерною технікою, що дозволяє повністю автоматизувати процес масштабування зображення.

1.2.2. Огляд зум-афокальних систем з використанням в них варіолінз

Порівняння двох типів зум-афокальних систем: Галілея та Кеплеря

Спочатку розглянемо зум-афокальну систему Галілея (рис. 1.19), вона побудована на двох варіолінзах. На відміну від класичної схеми, де лінзи рухаються вздовж осі, тут ми використаємо варіолінзи, в яких змінюватися буде лише оптична сила [8].

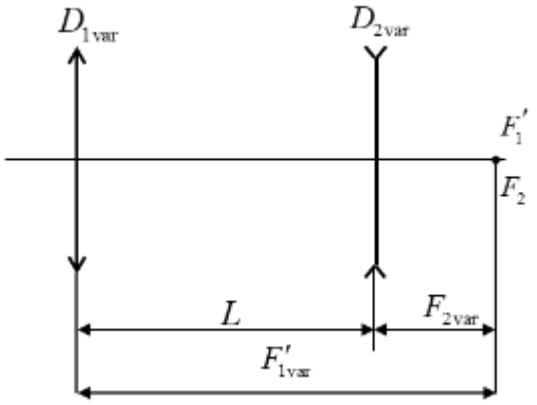


Рис. 1.18 Оптична система Галілея на тонких компонентах [8]

Основні параметри системи [8]:

1. Перший компонент (D_{1var}) – має позитивну оптичну силу (збиральна лінза).

2. Другий компонент (D_{2var}) – має негативну оптичну сили (розсіювальна лінза).

Поле зору в такій системі зазвичай обмежене краями першої лінзи (першої варіолінзи), яка працює як він'єтувальна діафрагма. Якщо ж за системою Галілея стоїть ще один нерухомий компонент, наприклад, фікс об'єктив, його оправа стає апертурною діафрагмою всієї системи [8].

Тепер розглянемо систему Кеплера (рис. 1.20), у цій системі обидва компоненти мають позитивну оптичну силу. Це створює певні обмеження, але

дає свої переваги діафрагмування пучків променів. Оскільки дана система формує перевернуте зображення кутове збільшення буде завжди від'ємним [8].

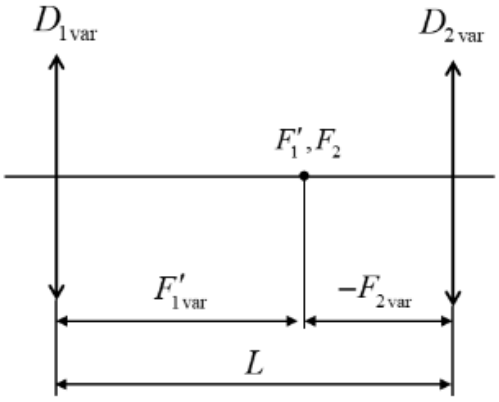


Рис. 1.19 Зум-афокальна система Кеплера в тонких компонентах [8]

Підсумок результатів порівняння цих двох систем:

1. Система Галілея

Вона складається з додатної та від'ємної лінз. Її головний плюс це, ця системи дає пряме зображення, що зручно для спостереження. А мінуси: у неї нема проміжного зображення, куди можна було б поставити польову діафрагму. Через це краї картинки виходять розмитими (віньєтування), поле зору значно вужче, ніж у системи Кеплера при тому ж збільшенні.

2. Система Кеплера

Тут вже обидва компоненти мають позитивну оптичну силу. Плюсом є те, що всередині системи формується реальне проміжне зображення. Це дозволяє встановити там польову діафрагму і отримати чітку, різку межу картинки. Крім того вхідна та вихідна зіниці тут не залежать від зовнішніх деталей. А головним мінусом є те що зображення виходить перевернутим (що в автоматизованих сенсорах часто не є проблемою, бо картинку на екрані монітору можна перевернути програмно).

1.3. Огляд електрично і механічно керованих адаптивних варіолінз.

Варіолінза - це оптична система, головна перевага якої полягає в тому, що вона змінює свою оптичну силу без жодного механічного руху. Не потрібно

пересувати лінзу механічно, як у старих системах, достатньо подати на неї відповідний керуючий електричний сигнал [9].

Вона працює так: під дією електричного сигналу всередині лінзи відбувається фізичні зміни які впливають на хід світлових променів, це може бути як зміна кривизни поверхні так і зміна показника заломлення [9].

Під час зміни кривизни поверхні система керування змушує форму робочої поверхні (наприклад мембрани або краплі рідини) вигинатися сильніше або ставати пласкішою [9].

Ще вона може змінювати показник заломлення, під час цього зовнішнє керування впливає на самі властивості оптичного середовища, змішуючи його заломлювати світло інакше [9].

Загалом таких лінз є 4 види [9]:

1. Мембранні варіолінзи
2. Варіолінзи на основі ефекту електрозмочування
3. Діелектрофоретичні варіолінзи
4. Рідкокристаличні варіолінзи

Більш детально розглянемо саме мембранні та варіолінзи на основі ефекту електрозмочування, бо вони є найбільш ефективними та дослідженими на сьогодення.

1.3.1. Мембранні варіолінзи

Самими першими варіолінзами почали досліджувати саме мембранні варіолінзи. Вони технічно простіші за інші типи, тому їх почали розробляти та використовувати раніше [9].

В основі такої лінзи лежить еластична прозора плівка (мембрана). Вона розділяє два різних оптичних середовища (наприклад, повітря і воду або дві різні рідини) [9].

Забезпечення однакової густини обох рідин є принциповим фактором. Це дозволяє нівелювати вплив гравітаційного поля на форму робочої поверхні лінзи, що гарантує стабільність оптичних параметрів монокуляра незалежно від його

орієнтації у просторі. Без такої компенсації виникали б неконтрольовані аберації (зокрема астигматизм), що зробило б неможливим використання приладу як мобільного пристрою спостереження.

Якщо використовувати дві рідини, то дуже важливо, щоб вони мали однакову питому вагу. Це потрібно для того, щоб гравітація не перекошувала мембрану, коли ми будемо повертати лінзу боком або догори ногами.

Найкращим матеріалом для таких лінз визнано полідиметилсилоксан (PDMS). Він ідеально підходить, бо відповідає жорстким критеріям [9]:

Перший критерій це прозорість, мембрана з полідиметилсилоксан буде ідеально пропускати світло і буде гладенькою, навіть коли дуже сильно розтягнута. Наступним критерієм є еластичність, плівка з PDMS коли буде сильно випинатися, то не будуть виникати мікротріщини і миттєво буде повертати свою форму, як тільки тиск зникне. І останнім критерієм є стійкість, вона не буде танути на сонці (під час УФ-випромінювання), розбухати від вологи чи вступати в хімічну реакцію з рідиною всередині [9].

Як взагалі керувати фокусом в такій лінзі, все це вирішується різницею тиску з обох боків мембрани Якщо тиск буде однаковий мембрана стане пласкою, а якщо з якогось із боків тиснути сильніше, вона стане опуклою чи увігнутою [9].

Ці всі операції можна побачити на рис. 1.20

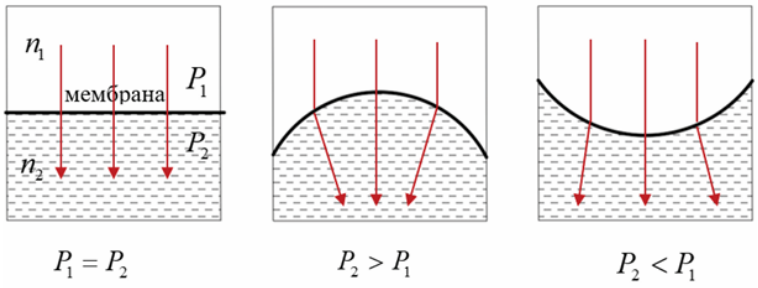


Рис. 1.20 Принцип дії мембранної варіолінзи: n_1 , n_2 – показники заломлення оптичних середовищ над мембраною і під нею; P_1 , P_2 – тиск над і під мембраною відповідно [9]

Таким чином, ефективність мембранних варіолінз безпосередньо залежить від матеріалу. Поєднання високої еластичності мембрани з можливістю тонкого регулювання тиску дозволяє замінити складні механічні приводи переміщення лінз на статичну систему. Це створює базу для проєктування надійних автоматизованих систем, які не мають люфтів та механічного зносу, що є ключовою перевагою.

Щоб така лінза могла сильніше змінювати свою оптичну силу, потрібна дотримуватися наступних умов [9]:

1. Використовувати рідини з великою різницею у показниках заломлення.
2. Створювати більший діапазон тиску на мембрану.
3. Обирати максимально еластичні матеріали для мембрани (з низькою константою пружності).

Оптимізація цих трьох параметрів дозволяє значно розширити діапазон фокусних відстаней без збільшення фізичних габаритів лінзи. Це критично важлива для зум-насадок у малих приладах, оскільки дозволяє досягти високої кратності збільшення при збереженні компактності системи. Використання рідин з високим показником заломлення у поєднанні з еластичною мембраною дає можливість отримати більшу крутизну вигину при менших енерговитратах актуатора.

Для того, щоб мембрана вигиналася, потрібно використовувати спеціальні приводи, так звані актуатори. За роки досліджень придумали безліч варіантів: від звичайних шприців та серводвигунів до штучних м'язів та п'єзоелементів. Усі ці типи можно поділити на дві групи [9]:

1. Розділені системи (лінза та резервуар)

Тут камера лінзи та бак з надлишком рідини – це окремі вузли. Працює це на сервоприводі який в свою чергу рухає поршень (як у шприці), який втягує або виштовхує рідину в камеру лінзи через тонкий канал. Керування виконується через спеціальну електроніку, вона точно фіксує положення поршня, що

дозволяє програмувати потрібну оптичну силу. На рис. 1.21 показано схему представника цієї групи. [9]

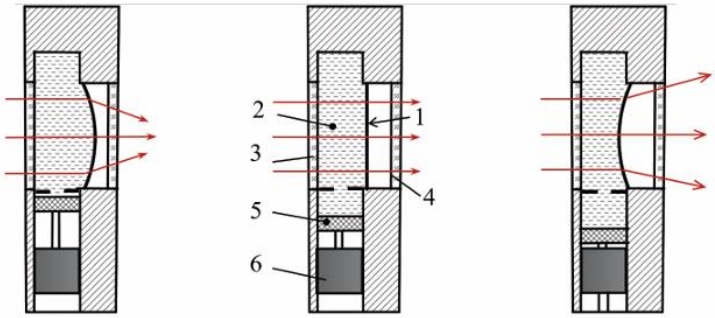


Рис. 1.21 Мембранна двокамерна варіолінза: : 1 – мембрана; 2 – рідина; 3, 4 – вхідне і вихідне скляні вікна; 5 – поршень; 6 – сервопривід [9]

2. Поєднані системи (компактні)

У цьому типі камера та резервуар це єдине ціле. Замість поршня тут використовується п'єзоелектрична пластина. При подачі напруги вона вигинається, вигин всередину об'єм зменшується, рідина витискає мембрану назовні (додатня лінза), вигин назовні – об'єм збільшується, мембрана втягується (від'ємна лінза). На рис. 1.22 показано схему представника цієї групи [9].

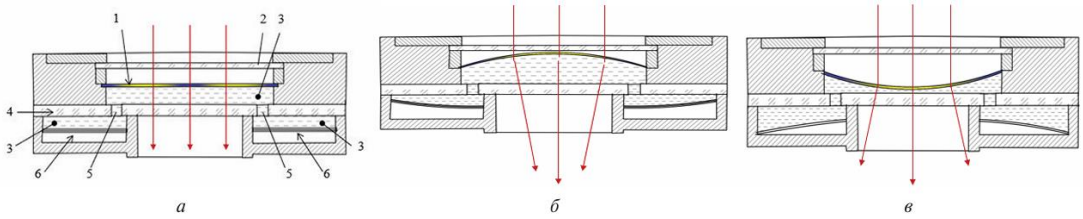


Рис. 1.22 Мембранна однокамерна варіолінза: 1 – мембрана; 2 – вхідне скляне вікно; 3 – рідина варіолінзи; 4 – скло з отворами; 5 – отвори в деталі 4; 6 – металева мембрана [9]

Порівнюючи ці дві групи, можна стверджувати, що розділені системи більше підходять для лабораторних установок або великогабаритних приладів, де пріоритетом є максимальний діапазон фокусування незалежно від розміру пристрою. Для розроблюваного автоматизованого зум-монокуляра критично важливими є мінімальна маса, швидкість реакції та компактність, тому поєднана архітектура є найбільш раціональним вибором. Вона дозволяє інтегрувати зум-

блок безпосередньо в габарит насадки, забезпечуючи високу частоту зміни збільшення без механічних люфтів та інерційних затримок, властивих системах з віддаленими резервуарами.

На сьогодні відомими моделями варіолінз є моделі від компанії Optotune(рис. 1.23), які мають свої особливості. Його особливості це, по-перше, електричне керування, яке забезпечує швидку реакцію (лічені мілісекунди), та механічне керування, тут використовується зубчасте колесо та кроковий двигун для надточної настройки, точність до ±0.1дптр. [10].

Популярність варіолінз швейцарської компанії Optotune обумовлена їхньою високою технологічною зрілістю. Наявність інтегрованої системи температурної компенсації та можливість вибору між швидким електричним або прецизійним механічним керуванням дозволяє розв’язати проблему стабільності фокусної відстані. Це дає змогу повністю відмовитися від традиційних вузлів переміщення скляних лінз, замінивши їх надійним електронним контуром керування що суттєво підвищує ресурс роботи приладу.

Рис. 1.23 Моделі мембранних варіолінз швейцарської компанії Optotune [10]

1.3.2. Варіолінзи, що працюють на ефекті електрозмочування

Якщо у мембранних лінзах треба тиснули на плівку, то тут це працює витонченіше. В основі лежить ефект електрозмочування, де формою лінзи керує напряму електричне поле, а не механічний привід [9].

Коли крапля рідини потрапляє на поверхню, вона набуває якусь форму. Це дія двох сил [9]:

1. Когезія – сили, що тримають молекули рідини разом (змушують краплю бути кулькою).

2. Адгузія – сили тяжіння між рідиною та поверхнею (змушують нашу краплю розтікатися).

Аналіз цих двох сил дозволяє зрозуміти, що форма рідкої лінзи є результатом динамічної рівноваги поверхневого натягу на межах розділу середовищ. Головна перевага такого підходу полягає у відсутності будь-яких проміжних еластичних елементів, наприклад мембран. Це дозволяє уникнути проблем, пов'язаних із втомою матеріалу плівки або її механічним старінням. Таким чином оптичний елемент стає фактично вічним, оскільки його робота базується виключно на фундаментальних молекулярних взаємодіях у рідкому середовищі.

На рис. 1.24 показано векторну діаграму сил натягу, що діють на каплю рідини, у місцях її контакту з поверхнею іншого твердого матеріалу.

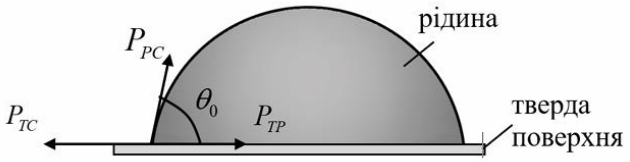


Рис. 1.24 Векторна діаграма сил натягу: P_{TP} – сила натягу на межі твердої речовини й рідини; P_{TC} – сила натягу на межі твердої речовини і середовища навколо краплі рідини; P_{PC} – сила натягу на поверхні краплі рідини, що контактує із середовищем навколо краплі рідини; θ_0 кут контакту [9]

Те, наскільки крапля розпливається, визначається кут контакту (θ_0) [9]:

1. Якщо кут $\theta_0 = 0°$ – крапля повністю розтікається
2. Якщо кут $\theta_0 = 90°$ – крапля вигинається як півсфера
3. Якщо кут $\theta_0 = 180°$ – крапля стає ідеальною кулькою

Якщо крапля прозора, а середовище навколо неї має інший показник заломлення, то ми отримуємо готову лінзу. Змінюючи кут контакту, ми автоматично змінюємо кривизну цієї лінзи, а отже і її оптичну силу [9].

Здатність безпосередньо впливати на кут контакту за допомогою електричного поля відкриває шлях до створення надшвидких адаптивних систем. Оскільки зміна кривизни поверхні відбувається на молекулярному рівні під дією електростатичних сил, час відгуку таких лінз є мінімальним серед усіх існуючих аналогів. Для розроблювального автоматизованого монокуляра використання ефекту електрозмочування дозволяє досягти плавної та прецизійної зміни оптичної сили без найменших механічних вібрацій. Це забезпечує ідеальну стабільність зображення при зміні збільшення, що є ключовим фактором при спостереженні за динамічними об’єктами на великих дистанціях.

Щоб зрозуміти, як електрика керує фокусом, уявіть собі краплю, яка лежить на тонкому шарі ізолятора. Під цим ізоляторам знаходиться металевий електрод [9].

Процес буде виглядати так [9]:

1. Подача напруги: коли ми подаємо напругу, система починає працювати як мікроскопічний конденсатор
2. Накопичення зарядів: позитивні заряди збираються на поверхні ізолятора прямо під краплею, а негативні – на самому електроді знизу.
3. Зміна натягу: ці заряди створюють силу яка притягує краї краплі до поверхні. В результаті сила, яка тримала краплю у формі кульки, слабшає під дією зовнішнього електричного поля.
4. Зміна форми: крапля починає сильніше прилипати до поверхні (розтікатися).

Щоб краще зрозуміти ці процеси наведений рис. 1.26.

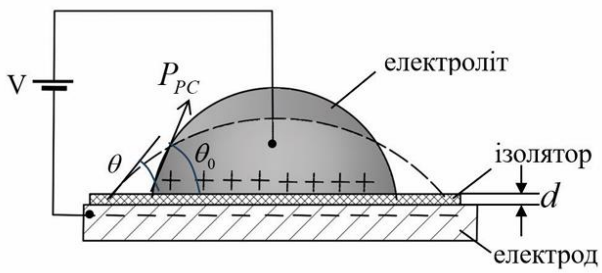


Рис. 1.25 Вплив прикладеної напруги V на форму краплі (штрихова лінія) [9]

Як результат, без напруги крапля має великий кут контакту (вона опукла), а під напругою кут θ_0 зменшується, крапля стає плоскішою (рис. 26).

Описаний процес перетворення краплі в мікроконденсатор демонструє високу енергоефективність методу. Оскільки зміна форми краплі відбувається за рахунок електростатичної взаємодії, а не механічного тиску чи нагріву, такі системи споживають мінімальну кількість енергії. Це означає що можливо створювати прилади, які здатні надзвичайно швидко та точно змінювати фокусну відстань, зберігаючи при цьому стабільність оптичних характеристик протягом тривалого часи використання.

Звичайна крапля води на поверхні, як ми бачили раніше, зазвичай працює тільки як позитивна збиральна лінза. Але в техніці часто потрібно, щоб лінза могла ставати розсіювальною (від’ємною) або перетворюватися на звичайне плоске скло. Для цієї задачі винайшли спеціальну комірку з двома рідинами, які не змішуються між собою [9].

Всередині герметичного циліндра знаходяться: провідна вода (електроліт), оптична олія (ізолятор). Важлива умова: обидві рідини прозорі, мають різний показник заломлення (у олії він вищий), але їхня вага (густина) майже однакова, щоб лінза працювала стабільно в будь-якому положенні [9].

Внутрішні стінки циліндра вкриті ізолятором та спеціальним гідрофобним шаром, який спочатку відштовхує воду [9].

Принцип базується на тому, що напруга V впливає на кут контакту пропорційно своєму квадрату V^2 [9]:

Без напруги: через те, що поверхня стінок боїться води, межа між водою та олією вигинається всередину види(стає опуклою для олії). Оскільки світло проходить з олії у воду, лінза працює як розсіювальна.

Середня напруга: ми подаємо струм заряди накопичуються на стінках, і вода починає сильніше прилипати до них (ефект електрозмочування). Межа розділу вирівнюється. Тепер це просто прозора пластина, яка не заломлює світло

Висока напруга: Вода настільки сильно змочує стінки, що межа стає увігнутою. Світловий пучок збирається в точку, ми отримаємо збиральну лінзу.

Використання системи з двома рідинами, що не змішуються, кардинально розширює можливості адаптивної оптики порівняльно з однокомпонентними краплями. Ключовою перевагою тут є можливість повної інверсії оптичної сили – від від'ємних значень (розсіювання) до додатних (збирання) через нейтральний стан плоскої поверхні. Це дозволяє використовувати таку лінзу не лише для фокусування, а й як активний елемент для компенсації складних оптичних спотворень у системі. Рівність густин електроліту та олії гарантує, що сформований меніск залишиться ідеально сферичним при будь-яких нахилах приладів.

На ринку такі лінзи активно представляє компанія Corning® Varioptic®. Вони ідеальні для системи з автоматичним фокусуванням, де не потрібні великі розміри. Нижче зображені деякі моделі цієї компанії (рис. 1.26) та конструкцію комерційних моделей електрозмочуваних лінз(рис. 1.27) [11].

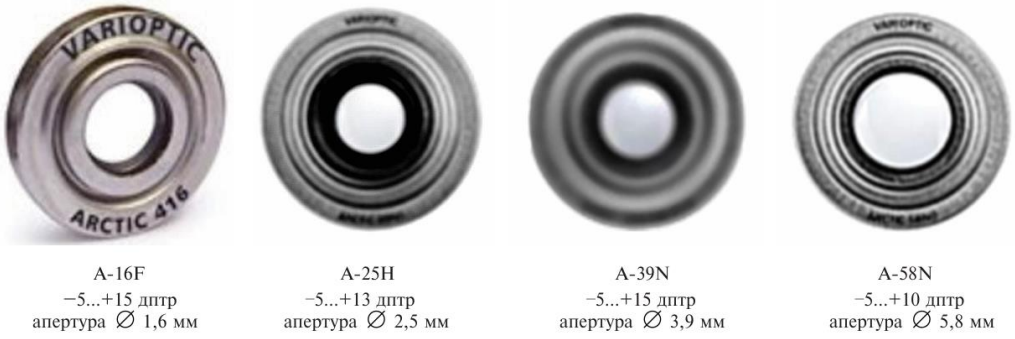


Рис. 1.26 Моделі електрозмочуваних лінз [11]

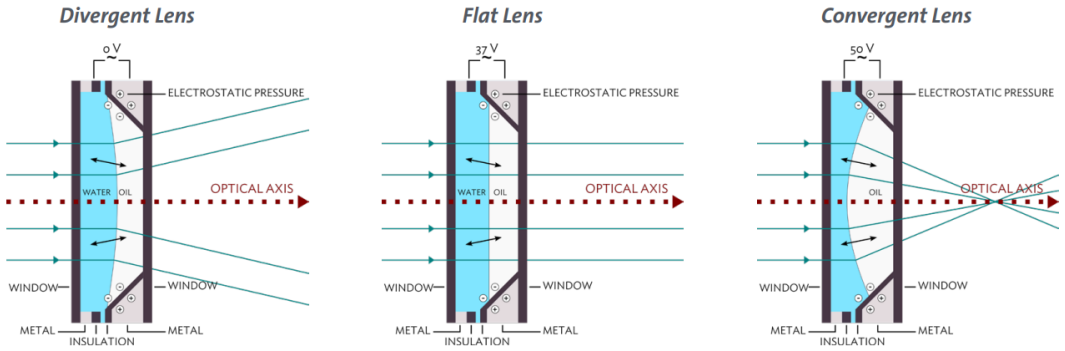


Рис. 1.27 Конструкція електрозмочуваних лінз компанії Corning [11]

1.3.3. Мембранні варіолінзі: Серія EL та ML від Optotune та їх порівняння

Для детального ознайомлення з можливостями сучасних адаптивних систем розглянемо характеристики реальної моделі рідкої лінзи виробництва компанії Optotune (Швейцарія). Модель яку розглянемо спочатку буде EL-16-30-TC-VIS-20D (Рис. 1.28) є характерним представником класу лінз зі змінною формою поверхні, що керуються електромагнітним актуатором.

Рис. 1.28 Вигляд EL-16-40-TC [12]

Нижче наведено систематизовані дані, отримані на основі технічної специфікації виробництва, які є критичними для розрахунку автоматизованих оптичних систем.

Таблиця 1.1Технічні параметри рідкої лінзи EL-16-40-TC-20D [12]

Параметр	Технічне значення	Коментар
Світловий діаметр (Clear Aperture)	16.0 мм	Забезпечує роботу з широкими пучками без він’єтування
Діапазон оптичної сили	від -10.0 до +10.0 дптр	Сумарний діапазон зміни становить 20 діоптрій
Час відгуку (Rise time)	7 мс	Час фізичної деформації мембрани
Час встановлення (Settling time)	40 мс	Час до повного заспокоєння осциляцій рідини
Повторюваність	± 0.1 дптр	Висока точність при циклічних перемиканнях
Робочий струм	від -250 до +250 мА	Керування здійснюється лінійною зміною струму
Інтерфейс компенсації	I2C (STTS2004)	Вбудований датчик температури та EEPROM

Спираючись на наведені параметри можна сформувати наступні висновки щодо інтеграції даного компонента в проєктовану оптичну систем:

1) Динамічний діапазон: Завдяки широкому діапазону зміни оптичної сили ±10 дптр, лінза EL-16-40 здатна ефективно виконувати функції фокусувального елемента, так і компонента зум-афокальної системи, компенсуючи зміну положення площини зображення при зміні масштабу.
2) Вплив гравітації: Згідно з наведеними даними від виробника, якість хвильового фронту суттєвою мірою залежить від орієнтації оптичної осі. При горизонтальному розташуванні осі картинка спотворюється, що зумовлено перерозподілом маси рідини під дією сили тяжіння. Це вимагає враховувати просторову орієнтацію самого приладу при його використанні.

3) Температурна залежність: Оскільки показник заломлення залежить від температури, наявність вбудованого датчика температури дозволяє реалізувати програму корекцію керуючого сигналу, що забезпечить нам стабільність фокусної відстані в робочому діапазоні температур які зазначені виробником.
4) Експлуатаційна надійність: Відсутність потреби у фізичному переміщенні компонентів для зміни оптичної сили, на відміну від традиційних систем із механічними приводами, забезпечує даному класу лінз високу експлуатаційну надійність із ресурсом понад 10^9 циклів спрацювання.

Далі перейдемо до розгляду іншої моделі – ML-20-37 (Рис. 1.29), яка є одним із найпотужніших рішень від виробництва Optotune. На відміну від попередньої моделі ця лінза орієнтована на системи, де пріоритетом є максимальний світловий діаметр та значний діапазон регулювання фокусної відстані

Рис. 1.29 Вигляд ML-20-37 [12]

Нижче наведено систематизовані технічні параметри, що були взяті з паспортних даних виробника та є критичними для поєктування системи із великою кратністю збільшення.

Таблиця 1.2 Технічні параметри рідкої лінзи ML-20-37 [12]

Параметр	Значення	Коментар
Світловий діаметр (Clear Aperture)	20.0 мм	Дозволяє інтеграцію в системи з великими вхідними зіницями
Діапазон оптичної сили	від -18.0 до +18.0 дптр	Забезпечує сумарну зміну у 36 діоптрій
Час відгуку (Rise time)	< 25 мс	Швидкість деформації мембрани при зміні сигналу

Продовження таблиці 1.2

Параметр	Значення	Коментар
Час встановлення (Settling time)	< 40 мс	Час до повної стабілізації оптичних характеристик
Хвильова помилка (RMS)	< 0.3 λ	Гарантується при вертикальному положенні оптичної осі
Робочий струм	від -250 до +250 мА	Керування здійснюється через електромагнітний актуатор

Спираючись на наведені параметри можна сформувати наступні висновки щодо інтеграції даного компонента в проєктовану оптичну систем:

1) Оптична потужність: Модель ML-20-37 відрізняється дуже великим діапазоном зміни оптичної сили (36 діоптрій). Це робить її оптимальним компонентом для афокальних насадок, де необхідно забезпечити значну зміну масштабу зображення або компенсувати великі розбіжності пучків.
2) Геометричні параметри: Світловий діаметр 20 мм. є одним із найбільших показників для сучасних варіолінз. Для проєктованого монокуляра це дозволяє значно знизити рівень він'єтування та зберегти високу світлосилу системи на всьому діапазоні зумування.
3) Експлуатаційна надійність: Як і в усіх варіолінзах вона дуже велика із-за того що нема фізичного переміщення - 10^9 циклів.
4) Гравітаційна залежність: Важливою особливістю ML-20-37, зафіксованою в документації, є її чутливість до сили тяжіння. Через значну масу рідини та велику площу мембрани, при відхиленні оптичної осі від її нормального положення виникає аберація коми. Це зумовлює необхідність врахування робочого положення приладу для забезпечення високої якості зображення.

Незважаючи на ідентичний принцип дії, модель ML-20-37 є більш функціональною для систем із високою кратністю збільшення, тоді як EL-16-40 забезпечує кращу динаміку та стабільність характеристик у ширшому

температурному діапазоні. Обидві лінзи мають дуже велику експлуатаційну надійність, що є ключовою перевагою над механічними системами переміщення.

РОЗДІЛ 2 ГАБАРИТНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНОКУЛЯРА

Задачею цього розділу є розробка оптичної системи монокуляра, який є фіксованою частиною системи зум-монокуляра. Розробка системи монокуляра передбачає виконання наступних пунктів:

- габаритний розрахунок оптичних елементів оптичної системи;
- обгрунтований вибір оптичних компонентів системи;
- компоновка оптичної системи монокуляра;
- контроль телескопічності системи та її параксіальних параметрів на відповідність вихідним даним;
-

2.1. Габаритний розрахунок оптичних компонентів системи монокуляра

Вихідними даними до такого розрахунку слугують зовнішні оптичні характеристики системи і параметри разом із заданими габаритними обмеженнями. До них належать:

Г− видиме (або γ кутове збільшення) монокуляра,

2ω − кут поля зору монокуляра у просторі предметів,

D' або $D_{вих}$ − діаметр вихідної зіниці,

L − осьова довжина оптичної системи,

ψ − кутова межа дифракційного просторового розділення у просторі предметів,

t' − віддалення вихідної зіниці монокуляра від останньої оптичної поверхні окуляра,

k_ω − коефіцієнт допустимого він'єтування пучка променів, що надходить в оптичну систему монокуляра від краю поля зору.

Згідно Завдання оптична система монокуляра повинна мати наступні зовнішні параметри:

$$L = 100 мм.$$

$$\Gamma = 4$$

$$2\omega = 10°$$

$$D_{вих} = 3мм.$$

$$t' = 15мм.$$

Обертальна система монокуляра – призма Шмідта

У процесі виконання габаритного розрахунку необхідно визначити значення поздовжніх і поперечних параметрів оптичних елементів, а також основні розміри окремих деталей оптичної системи, зокрема:

$f'_{об}$ – задня фокусна відстань об'єктива,

$f'_{ок}$ – задня фокусна відстань окуляра,

a – розмір вхідної та вихідної граней призми,

d - довжина дзеркальної розгортки призми,

$D_{об}$ – діаметр світлового отвору об'єктива,

$D_{ок}$ – діаметр світлового отвору окуляра,

$D_{пд}$ – діаметр отвору польової діафрагми,

$2\omega'$ - величина поля зору монокуляра у просторі зображень

На основі результатів габаритного розрахунку здійснюється підбір типу об'єктива та окуляра.

Розрахунок фокусних відстаней об'єктива – $f'_{об}$ – та окуляра – $f'_{ок}$

Фокусні відстані об'єктива $f'_{об}$ та окуляра $f'_{ок}$ монокуляра, який в основі має телескопічну систему Кеплера(рис. 2.1), визначаються з системи рівнянь(2.1).

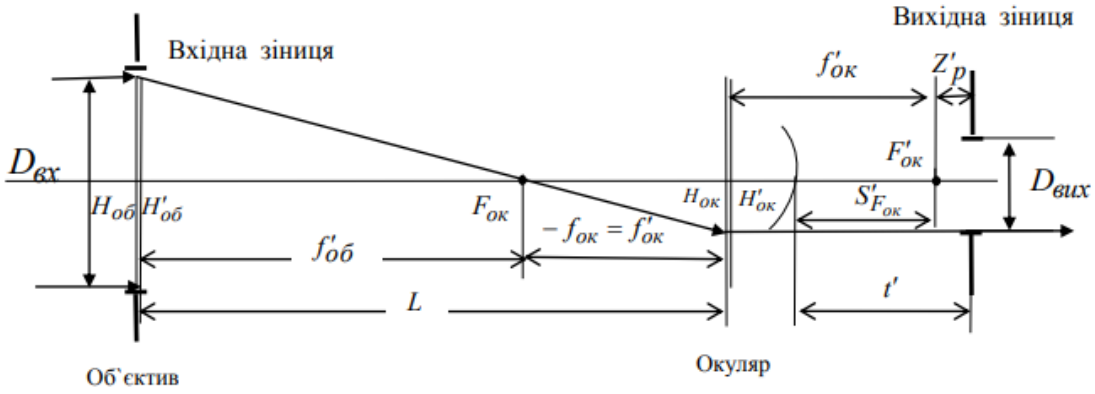


Рис. 2. 1 Телескопічна система Кеплера [2]

$$\begin{cases} f'_{об} + f'_{ок} = L \\ \Gamma = \dfrac{f'_{об}}{f'_{ок}} \end{cases} \tag{2.1}$$

Якщо розв’язати дану систему рівнянь (2.1) [2] можемо отримати формули для обрахунку фокусних відстаней окуляра (2.2) [1] та об’єктива (2.3) [1]:

$$f'_{ок} = \frac{L}{\Gamma + 1} \tag{2.2}$$

$$f'_{об} = \frac{\Gamma \cdot L}{\Gamma + 1} \tag{2.3}$$

Якщо в результаті розрахунків отримане значення фокусної відстані окуляра не належить до стандартного уніфікованого ряду (15, 20, 25, 30, 35 мм), його необхідно округлити до найближчого значення з цього ряду. Після цього слід скоригувати фокусну відстань об’єктива $f'_{об}$ за відповідною формулою (2.4) [1], підставивши в неї нове вибране значення $f'_{ок}$.

$$f'_{об} = \Gamma \cdot f'_{ок} \tag{2.4}$$

При цьому загальна осьова довжина оптичної системи L змінюється відповідно до першого рівняння системи (2.1). Вважається, що відхилення отриманого значення L у межах ±10% від початково заданого є допустимим.

Далі зробимо розрахунок, для знаходження задніх фокусних відстаней об’єктива та окуляра:

$\Gamma = 4$

$L = 100мм.$

Для розрахунку потрібно використати формули 2.2 та 2.3:

$$f'_{ок} = \frac{100}{4+1}$$

$$f'_{об} = \frac{4 \cdot 100}{4+1}$$

В результаті маємо такі значення:

$$f`_{об} = 80мм.$$

$$f`_{ок} = 20мм.$$

Розрахунок світлового діаметру об'єктиву $D_{св.об.}$

У телескопічній оптичній системі Кеплера апертурна діафрагма суміщена з об'єктивом, тому саме його оправа виконує функцію вхідної зіниці. Внаслідок цього світловий діаметр об'єктива $D_{св.об.}$ чисельно дорівнює діаметру вхідної зіниці.

Згідно з оптичною схемою (рис. 2.1), відношення діаметра вхідної зіниці до діаметра вихідної зіниці визначається як відношення фокусних відстаней об'єктива та окуляра. Це співвідношення також відповідає значенню кутового (видимого) збільшення оптичної системи [1].

$$\frac{D_{вх}}{D_{вих}} = |\Gamma| \tag{2.5}$$

Звідси:

$$D_{св.об.} = D_{вих} \cdot |\Gamma| \tag{2.6}$$

Тепер розрахуємо значення світлового діаметру об'єктиву використовуючи формулу 2.6:

$$D_{вих} = 3мм.$$

$$D_{св.об.} = D_{вих} \cdot |\Gamma|$$

В результаті маємо значення:

$$D_{св.об.} = 12мм.$$

Розрахунок діаметру польової діафрагми

Діаметр польової діафрагми, яка визначає та обмежує задане поле зору монокуляра, встановлюють за допомогою рис. 2.2. На ньому наведено хід двох променів, що проходять через осьову точку вхідної зіниці, суміщеної з головними точками об'єктива H' та $H'_{об}$, а також через краї польової діафрагми.

Ці промені надходять із простору об'єктів від меж поля зору, яке повинно мати кутовий розмір 2ω (див. рис. 2.2).

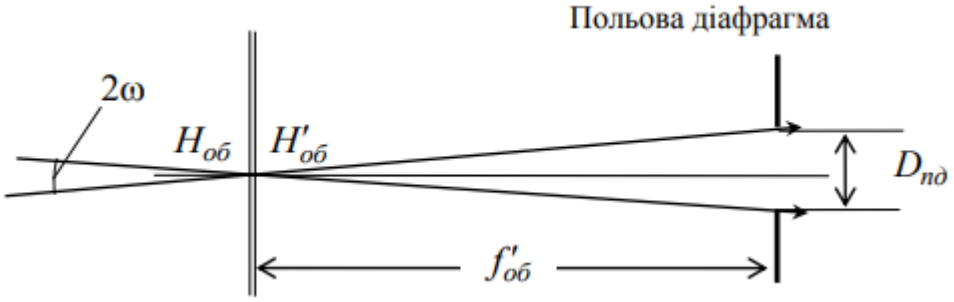


Рис. 2. 2 До розрахунку діаметру польової діафрагми [2]

За рис. 2.2 видно, що

$$\frac{\frac{1}{2}D_{пд}}{f'_{об}} = tg(\omega)$$

Звідси:

$$D_{пд} = 2 \cdot f'_{об} \cdot tg(\omega) \qquad (2.7)$$

Тепер обрахуємо значення діаметру польової діафрагми (Рис. 2.2):

$$\omega = 5°$$
$$D_{пд} = 2 \cdot f'_{об} \cdot tg(\omega)$$
$$D_{пд} = 13.99819$$

Округлюємо $D_{пд} = 14мм.$

Розрахунок кутового розміру поля зору 2ω′ у просторі об'єктів

Поле зору системи 2ω′ у просторі об'єктів визначається за формулою [1]:

$$2 \cdot \omega' = 2 \cdot \omega \cdot |\Gamma| \qquad (2.8)$$

Значення $2\omega^{'}$ також є полем зору окуляра, $2\omega^{'}_{ок} = 2\omega^{'}$.

Тепер розрахуємо значення кутового розміру поля зору у просторі об'єктів:

$2\omega = 10°$

$2\omega' = 10° \cdot |4| = 40°$

$2\omega'_{ок} = 2\omega'$

Розрахунок відстані t' між останньою поверхнею окуляра та вихідною зіницею монокуляра.

Під час спостереження через монокуляр користувач зазвичай автоматично вирівнює зіницю ока з вихідною зіницею приладу. Це положення є оптимальним, оскільки забезпечує максимальне проходження світлового потоку в око та, відповідно, комфортне бачення зображення в усьому полі зору.

Однак надто близьке розташування вихідної зіниці до окуляра може створювати незручності: вії здатні частково перекривати світловий пучок і викликати «затемнення» окремих ділянок зображення. У свою чергу, надмірне віддалення вихідної зіниці від окуляра також є недоцільним, оскільки воно призводить до збільшення конструктивних розмірів монокуляра, зокрема через подовження його корпусу та наочника.

З погляду ергономічних вимог оптимальною вважається відстань t' =(15…20) мм. Як видно з рис. 2.1, величина t' утворюється як сума двох складових відрізків [1]:

$$t^{'} = S^{'}_{F^{'}_{ок}} + Z^{'}_{p} \tag{2.9}$$

де $S^{'}_{F^{'}_{ок}}$ - задній фокальний відрізок окуляру, $Z^{'}_{p}$ - відстань між заднім фокусом окуляра $F^{'}_{ок}$ та вихідною зіницею

Для відрізка $Z^{'}_{p}$ будемо розраховувати за формулою [1]:

$$Z^{'}_{p} = \frac{\left[f^{'}_{ок} \right]^2}{f^{'}_{об}} \tag{2.10}$$

Величина відрізка $S'_{F'_{ок}}$ залежить від фокусної відстані окуляра $f'_{об}$ та його оптичної схеми. Тому тип окуляра слід підбирати з урахуванням вимог технічного завдання до величини t'. Обраний окуляр повинен забезпечувати задній фокальний відрізок, достатній для отримання значення t' не менше заданого в технічному завданні [1].

$$S'_{F'_{ок}} \geq t' - Z'_p = t' - \frac{\left[f'_{ок}\right]^2}{f'_{об}} \tag{2.11}$$

Вибір типу об'єктиву

Якщо поле зору об'єктива не перевищує 10° і потрібен лінзовий варіант, зазвичай обирають дволінзову склейку. Такі об'єктиви зручні тим, що в них відносно легко виправляються сферична аберація та хроматизм положення, що важливо для якісного зображення в монокулярах, біноклях, зорових трубах і телескопах-рефракторах.

Підбір об'єктива виконують за каталогом, де наведені його оптичні та конструктивні параметри. Основними розрахунковими величинами є задня фокусна відстань $f'_{об}$ та світловий діаметр $D_{св.об.}$, отримані з наведених вище формул.

Якщо точного значення фокусної відстані в каталозі немає, вибирають найближчий варіант. Далі його параметри коригують шляхом масштабування. Для цього вводять коефіцієнт масштабування [1]:

$$k = \frac{f'_{об(розр.)}}{f'_{об(кат.)}} \tag{2.12}$$

Де $f'_{об(розр.)}$ - обраховане значення фокусної відстані, $f'_{об(кат.)}$ вибране значення фокусної відстані з каталогу наближене до розрахованого.

Після аналізу отриманих значень, вибираємо об'єктив із каталогу посібника [1]:

Таблиця конструктивних параметрів об’єктиву

Світловий діаметр об’єктива	Задня фокусна відстань об’єктива	Конструктивні параметри та кардинальні параметри:
D	f'	КП
25	100	Конструктивні параметри: Радіус кривизни першої поверхні (R1) ..... 60,76918 мм Радіус кривизни другої поверхні (R2) ..... -38,42678 мм Радіус кривизни третої поверхні (R3) ..... -149,2518 мм Осьова товщина лінзи 1 (d1) ..... 5 мм Осьова товщина лінзи 2 (d2) ..... 2 мм Марка скла лінзи 1 ..... K8 Марка скла лінзи 2 ..... Ф9 Кардинальні параметри оптичного компонента: Задня фокусна відстань (f') ..... 100,001 мм Передній фокальний відрізок (Sf) ..... -98,9758 мм Задній фокальний відрізок (S'f') ..... 96,4498 мм

У нашому випадку задня фокусна відстань об’єктива дорівнює 80 мм. Тому потрібно перерахувати значення радіусів кривизни та осьової товщини. Так як для монокуляра будемо використовувати марки скла від компанії SCHOTT.

Таблиця 2.1 Перераховані конструктивні параметри об’єктива

Світловий діаметр об'єктива	Задня фокусна відстань об’єктива	Конструктивні параметри та кардинальні параметри
D	f'	КП
25	100	Конструктивні параметри: Радіус кривизни першої поверхні (R1) = 48,6888 мм. Радіус кривизни другої поверхні (R2) = -30,5816 мм. Радіус кривизни третьої поверхні (R3) = -119,4016 мм. Осьова товщина лінзи 1 = 4 мм. Осьова товщина лінзи 2 = 1,6 мм. Марка скла лінзи 1 …… N-BK7 Марка скла лінзи 2 …… N-KZFS4HT Кардинальні параметри оптичного компонента: Задня фокусна відстань: 100.001 мм Передній фокальний відрізок: $S_{F_{об}} = -79{,}18 мм.$ Задній фокальний відрізок: $S'_{F'_{об}} = 77{,}16 мм.$

Вибір типу окуляру

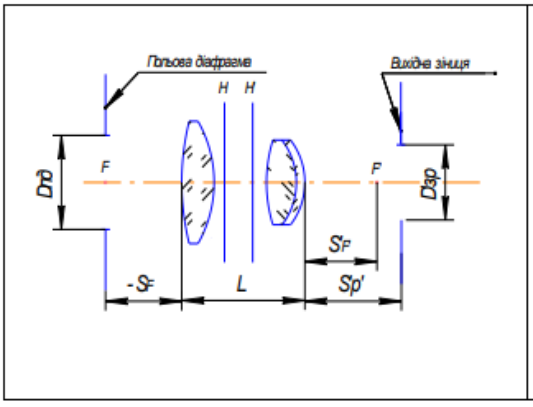
Вибір окуляра виконують на основі двох основних параметрів: кутового поля зору окуляра $2\omega'_{ок}$ та заднього фокального відрізка $S'_{F'_{ок}}$, який повинен забезпечувати значення t', не менше заданого у технічному завданні.

Насамперед визначають тип окуляра, здатний забезпечити розраховане значення кута поля зору $2\omega'_{ок}$. Для цього використовують каталог окулярів.

У каталозі [1] наведені параметри окулярів із фокусною відстанню 25 мм. Якщо ж розрахована фокусна відстань окуляра відрізняється від цього значення, застосовують масштабування. Для цього обчислюють коефіцієнт масштабування, який був наведений при виборі типу об'єктива.

Після визначення коефіцієнта масштабування всі геометричні параметри конструкції та кардинальні відрізки необхідно помножити на цей коефіцієнт. Лише після цього, отримавши відповідне значення $S'_{F'_{ок}}$, можна остаточно обрати тип окуляра, який забезпечить задане поле зору та потрібну величину відрізка t' .

Після того коли порівняли параметри, а саме: значення кутового поля зору окуляра $2\omega'_{ок}$ та заднього фокального відрізка $S'_{F'_{ок}}$. То окуляр який нам найкраще підходить по заданим параметрам буде:



Параксіальні характеристики

λ	f'_{ok} (мм)	$S'_{F'_{ok}}$ (мм)	$S_{F_{ok}}$ (мм)
e	25	8.97	-7.39

Максимальний розмір поля зору

$2\omega'_{ok}$ = 45 град

Оптичні параметри даного окуляра наведені нижче:

Таблиця 2.2 Конструктивні параметри вихідного окуляра

№ пов.	Радіуси кривизни	Осьові відстані	Світлові висоти	Марка скла	Показники заломлення		
					e(0.54607)	F'(0.480)	C'(0.6438)
				Повітря	1.0	1.0	1.0
1	66.22	6.0	12.25	N-BK7	1.518296	1.522406	1.514293
2	-31.12	18.0	11.75	Повітря	1.0	1.0	1.0
3	18.03	5.5	6.99	N-BAK2	1.542137	1.546791	1.537667
4	-13.552	1.5	6.41	N-KZFS4HT	1.624087	1.63313	1.615825
5	95.5		5.86	Повітря	1.0	1.0	1.0

Згідно замін оптичних матеріалів з радянських на матеріали фірми SCHOTT зробимо коригування конструктивних параметрів з метою збереження потрібного значення фокусної відстані.

Таблиця 2.3 Конструктивні параметри перерахованого окуляра

№ пов.	Радіуси кривизни	Осьові відстані	Світлові висоти	Марка скла	Показники заломлення		
					e(0.54607)	F'(0.480)	C'(0.6438)
				Повітря	1.0	1.0	1.0
1	52.976	4.8	9.8	N-BK7	1.518296	1.522406	1.514293
2	-24.896	14.4	9.4	Повітря	1.0	1.0	1.0
3	14.424	4.4	5.592	N-BAK2	1.542137	1.546791	1.537667
4	-10.8416	1.2	5.128	N-KZFS4HT	1.624087	1.63313	1.615825
5	76.4		4.688	Повітря	1.0	1.0	1.0

Габаритний розрахунок обертальної призми Шмідта призм та призмових поворотних систем

Оскільки система Кеплера дає перевернуте зображення, то обертальну призму в монокулярі використовують з метою забезпечення прямого зображення на виході монокулярі використовують з метою забезпечення прямого

зображення на виході монокуляра. Така призма обертає зображення навколо оптичної осі на 180 градусів, чим досягається вказаний результат.

Обертальну призму в оптичній системі монокуляра розміщують між об’єктивом і польовою діафрагмою (див. рис. 2.3).

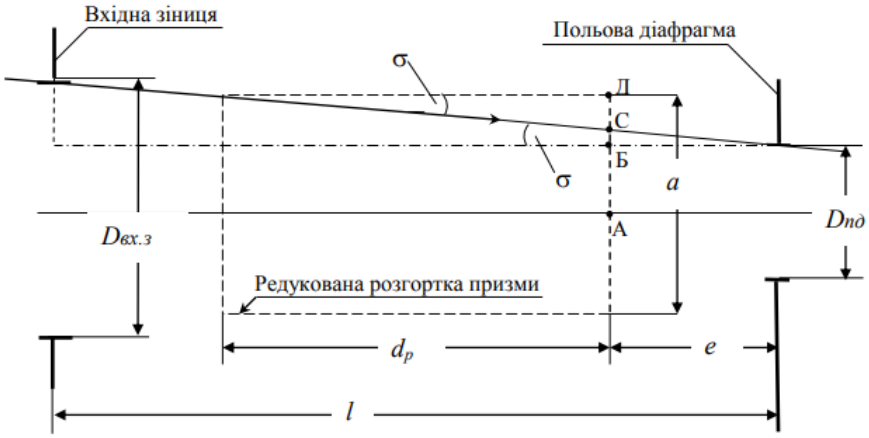


Рис. 2. 3 До габаритного розрахунку обертальної призми [2]

Під час габаритного розрахунку призму розглядають у вигляді її дзеркальної розгортки, яку умовно подають як плоскопаралельну пластину. Для будь-якої призми існує співвідношення між осьовою довжиною d та розміром грані a, [1]:

$$d = k \cdot a \tag{2.13}$$

де k — коефіцієнт, що залежить від типу призми (береться з довідкових матеріалів до призм [1])

Основною задачею є визначення розміру грані a, від якого залежать усі габаритні розміри призми. Вихідними даними для цього є параметри оптичної системи: діаметри вхідної зіниці та польової діафрагми, відстань між ними, мінімальний зазор до призми та показник заломлення матеріалу.

Для спрощення розрахунків використовують редуковану розгортку — умовну повітряну пластину, в якій промені поширюються прямолінійно без заломлення. Її осьова довжина визначається як [1]

$$d_p = \frac{d}{n} = \frac{a \cdot k}{n} \tag{2.14}$$

Перед розрахунком визначають, на якій грані призми світловий діаметр більший. Зазвичай це вхідна грань, яка і задає необхідний розмір а.

У типовому випадку, коли вхідна зіниця збігається з об'єктивом, відстань до польової діафрагми дорівнює задній фокусній відстані об'єктива. Відстань між призмою та діафрагмою повинна бути не меншою за 10 мм для уникнення впливу дефектів призми на зображення.

Після визначення а осьову довжину знаходять як $d = k \cdot a$, а всі інші розміри призми обчислюють через а за відповідними співвідношеннями.

Тепер використовуючи матеріал вище розрахуємо потрібні значення [1]:

$$e = 10$$

$$k_ш = 3.04$$

$$a = D_{вх} + \frac{(D_{пд} - D_{вх}) \cdot (f'_{об} - e)}{f'_{об}} = 13.74841$$

$$d = a \cdot k_ш = 41.79518$$

Округлюємо $d = 41.8 мм.$

2.2 Компоновка оптичної системи

Після встановлення габаритних параметрів оптичних компонентів системи монокуляра потрібно її скомпонувати, тобто встановити таке взаємне розміщення коомпонентів вздовж оптичної осі при якому система стає телескопічною.

На рис. 2.4 показано потрібне розташування оптичних компонентів в системі монокуляра.

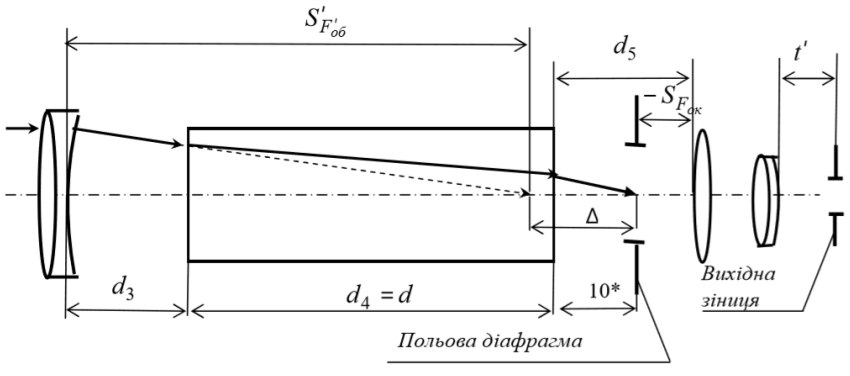


Рис. 2. 4 Оптична система монокуляра за схемою Кеплера [2]

Система стає телескопічною, коли задній фокус об'єктива, перенесений призмою, буде суміщеним з переднім фокусом окуляра, і в цьому місці буде знаходитися польова діафрагма. Для цього треба при заданому зазорі між призмою і польовою діафрагмою 10 мм. знайти потрібну відстань d_3.

Для того, щоб визначити вище вказані осьові відстані потрібно використати раніше розраховані відрізки $S_{F_{ок}}, S'_{F'_{об}}$ які були взяті з каталогів об'єктивів та окулярів [1]:

$$S'_{F'об} = 77{,}15984 мм.$$
$$d = 41.8 мм.$$

$n = 1.518296$, показник заломлення скла, що було оране для виготовлення призми (N-BK7).

Відрізок який вказує величину осьового зсуву сформованого об'єктивом зображення зсуву, обумовленому проходженням променів у призмі, можна розрахувати наступним чином [1]:

$$\Delta = \frac{n-1}{n} \cdot d$$
$$\Delta = \frac{1.51829-1}{1.51829} \cdot 41.8 = 14.27 мм.$$

Відстань від об'єктиву до призми d_3, можна розрахувати використовуючи рівняння [1]:

$$d_3 + d + 10 = S'_{F'_{об}} + \Delta$$

Звідси:

$$d_3 = S'_{F'_{об}} + \Delta - d - 10$$
$$d_3 = 77{,}15984 + 14.27 - 41.8 - 10 = 39.62$$

Результат компоновки системи представлено далі. Конструктивні

Параметри представлені в редакторі ZEMAX.

Конструктивні параметри скомпоновані системи монокуляра були додатково скориговані методом оптимізації системи на мінімум аберацій осьового і позаосьових пучків променів.

	Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0(unused)
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000	
1	Standard		Infinity	2.000		6.175	0.000	
STO	Standard		48.122	4.000	BK7	6.033	0.000	
3	Standard		-25.637	1.600	N-KZFS4HT	6.075	0.000	
4	Standard		-108.824	39.085		6.135	0.000	
5	Standard		Infinity	41.795	N-BK7	6.542	0.000	
6	Standard		Infinity	10.000		6.828	0.000	
7*	Standard		Infinity	5.912		6.936	0.000	
8	Standard		52.976	4.800	N-BK7	7.996	0.000	
9	Standard		-24.896	14.400		8.143	0.000	
10	Standard		14.424	4.400	N-BAK2	6.422	0.000	
11	Standard		-10.842	1.200	N-KZFS4HT	6.203	0.000	
12	Standard		-76.400	12.176		5.667	0.000	
13	Standard		Infinity	3.000		2.199	0.000	
IMA	Standard		Infinity	-		3.288	0.000	

Рис. 2. 5 Конструктивні параметри скомпонованої оптичної системи монокуляра

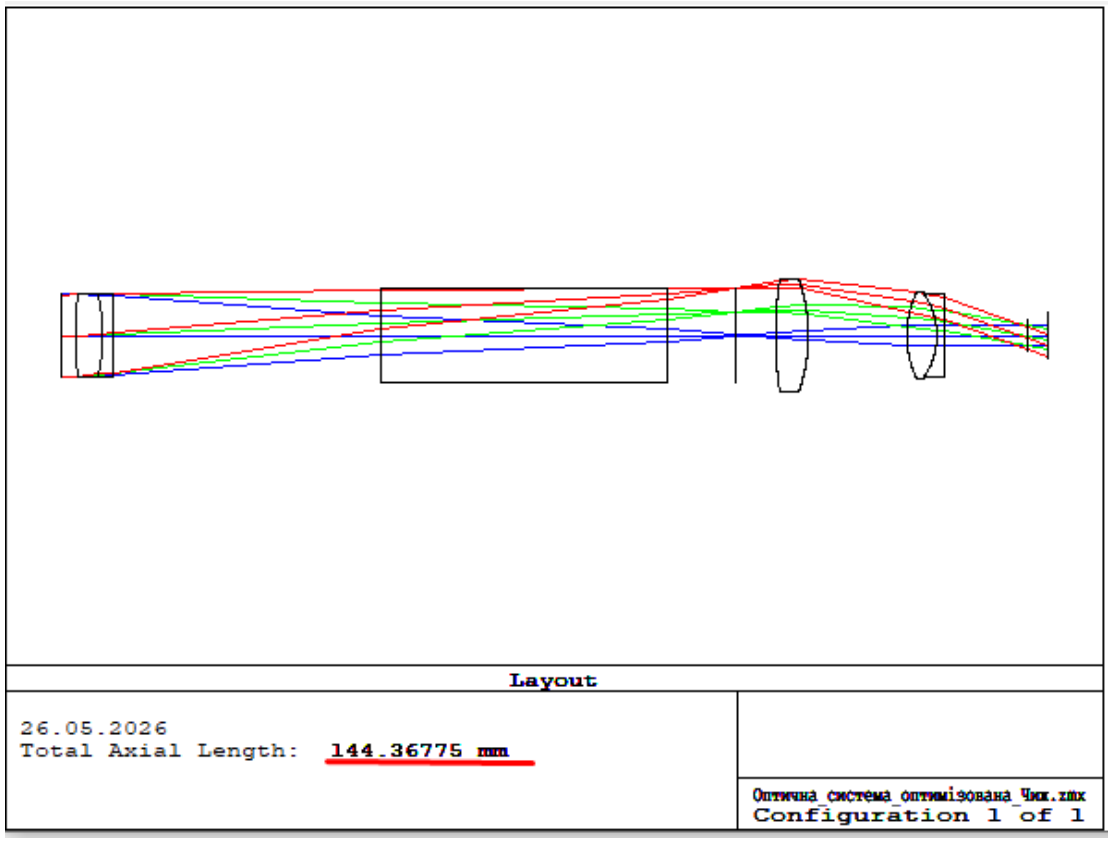


Рис. 2. 6 Хід променів трьох пучків променів в оптичній системі монокуляра

В протоколі нижче представлені параксіальні параметри оптичної системи монокуляра, показаної на рис.2.6

3: System Data

Update Settings Print Window

```
System/Prescription Data

File : C:\Users\HOME\Downloads\Оптична_система_оптимізована_Чиж.zmx
Title:
Date : 26.05.2026


GENERAL LENS DATA:

Surfaces                 :               14
Stop                     :                2
System Aperture          : Entrance Pupil Diameter = 12
Glass Catalogs           : SCHOTT
Ray Aiming               : Off
Apodization              : Uniform, factor =   0.00000E+000
Temperature (C)          :    2.00000E+001
Pressure (ATM)           :    1.00000E+000
Adjust Index Data To Environment  : Off
Effective Focal Length   :        6621.239 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length   :        6621.239 (in image space)
Back Focal Length        :       -1641.634
Total Track              :        144.3678
Image Space F/#          :        551.7699
Paraxial Working F/#     :        551.7699
Working F/#              :        294.6181
Image Space NA           :    0.0009061744
Object Space NA          :           6e-010
Stop Radius              :                6
Paraxial Image Height    :        579.2834
Paraxial Magnification   :                0
Entrance Pupil Diameter  :               12
Entrance Pupil Position  :                2
Exit Pupil Diameter      :        2.997131
Exit Pupil Position      :       -3.082924
Field Type               : Angle in degrees
Maximum Radial Field     :                5
Primary Wavelength       :       0.5875618 µm
Lens Units               :   Millimeters
Angular Magnification    :       -4.003828

Fields                   : 3
```

Рис. 2. 7 Протокол параксіальних параметрів оптичної системи монокуляра

Зміст протоколу параксіальних параметрів оптичної системи монокуляра, підтверджує телескопічність системи, допустимий осьовий габарит системи, потрібний діаметр вихідної зіниці та її розташування, а також задане кутове збільшення системи.

Для оцінки якості оптичного зображення, сформованого оптичною системою скомпонованого монокуляра позаду окуляра додаємо параксіальний компонент (параксіал-компонент) з фокусною відстанню 3.437 мм. Відомо, що параксіальний компонент не вносить аберацій. Якщо з телескопічної системи виходить паралельний пучок променів, то параксіал-компонент збирає всі промені в точку в своїй фокальній площині. При наявності кутової розбіжності

променів в пучку у фокальній площині параксіал-компонента сформується спот-діаграма тим більших розмірів, чим більшою є ця розбіжність.

Фокусна відстань праксіал-компонента для зручності аналізу кутових аберацій променів пучка підібрана такою (3.437 мм), щоб кутовий нахил променю на одну кутову хвилину зсував промінь в фокальній площині параксіал-компонента на один мікрометр.

Нижче на рис. 2.8 показано копію редактора, в якому оптична система монокуляра має розташований за нею вказаний параксіал-компонент, а на рис 2.9 показано хід променів в такій системі.

ves View Help

:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000
Standard		Infinity	2.000		6.175	0.000
Standard		48.122	4.000	BK7	6.033	0.000
Standard		-25.637	1.600	N-KZFS4HT	6.075	0.000
Standard		-108.824	39.085		6.135	0.000
Standard		Infinity	41.795	N-BK7	6.542	0.000
Standard		Infinity	10.000		6.828	0.000
Standard		Infinity	5.912		6.936	0.000
Standard		52.976	4.800	N-BK7	7.996	0.000
Standard		-24.896	14.400		8.143	0.000
Standard		14.424	4.400	N-BAK2	6.422	0.000
Standard		-10.842	1.200	N-KZFS4HT	6.203	0.000
Standard		-76.400	12.176		5.667	0.000
Standard		Infinity	3.000		2.199	0.000
Paraxial			3.437		3.288	
Standard		Infinity	-		1.248	0.000

Рис. 2. 8 Конструктивні параметри монокуляра з параксіал-компонентом

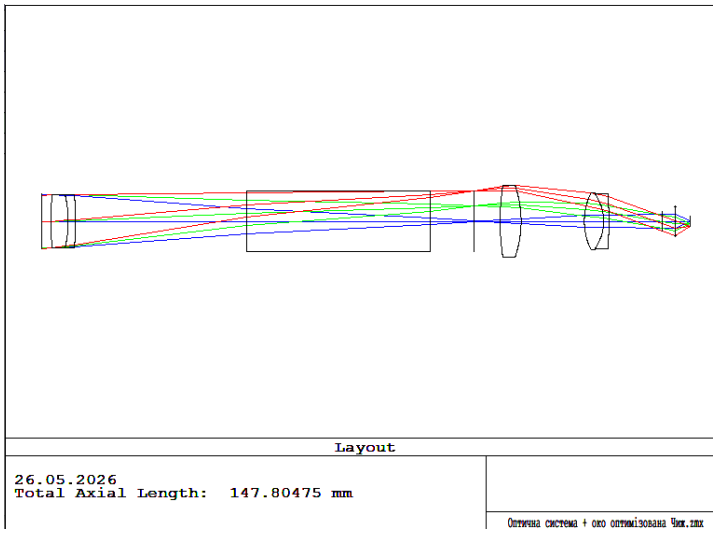


Рис. 2. 9 Оптична система монокуляра з параксіал-компонентом

На рис. 2.10 показано спот-діаграми пучків променів що надходять в систему від точок простору об’єктів з кутовими координатами $0°, 2.5°, 5°$. Останній кут відповідає кутовому розміру поля зору монокуляра $2\omega = 10°$.

При створенні діаграми використано стандартний комплект довжин хвиль, пристосований до візуальних оптичних систем, а саме довжини F, d, C.

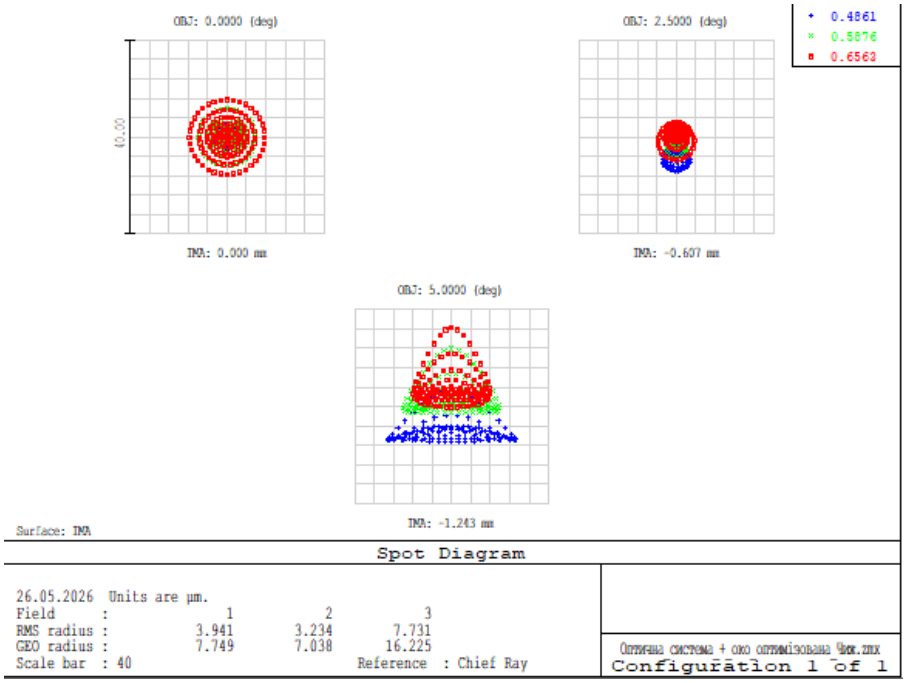


Рис. 2. 10 Спот діаграми пучків променів від точок простору предметів, кутові координати яких вказані вище в тексті

Вигляд спот-діаграм свідчить про наступне – сферична аберація в системі ще потребує подальшої мінімізації, поздовжня хроматична аберація і хроматизм збільшення можуть вважатися задовільними для візуальних систем.

Отримані результаті підтверджують допустимі на даному етапі стан аберацій оптичної системи, оскільки середньоквадратичний радіус (RMS) плями розсіювання на оптичній осі становить 3.94 мкм, тобто приблизно 4 кутових хвили, по полю зору – 3.23 кутові хвилин, а на краю поля зору значення RMS не перевищує 7.73 кутові хвилини.

Представлені далі графіки аберацій, рис. 2.11 - 2.14, демонструють аберраційні властивості розробленої в цьому розділі оптичної системи монокуляра.

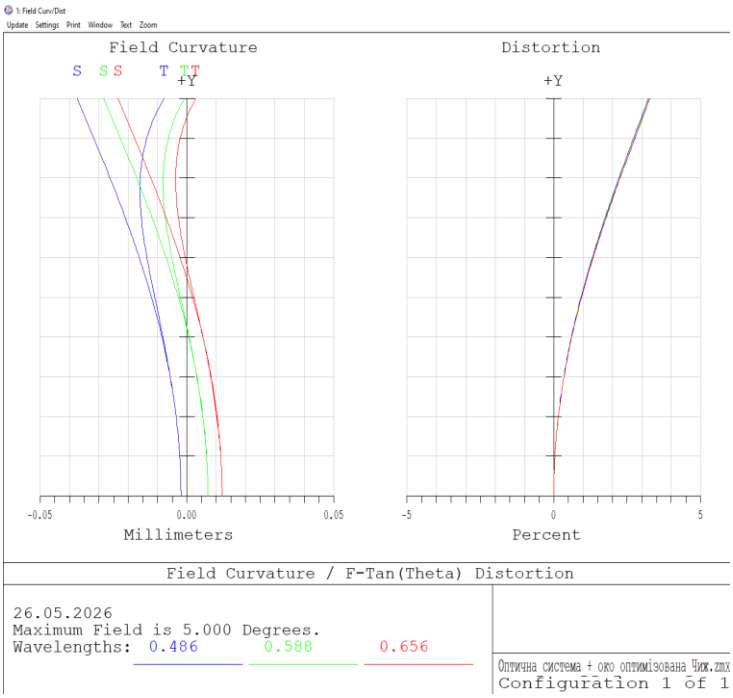


Рис. 2. 11 Графіки аберацій променів позаосьових пучків від астигматизму і дисторсії

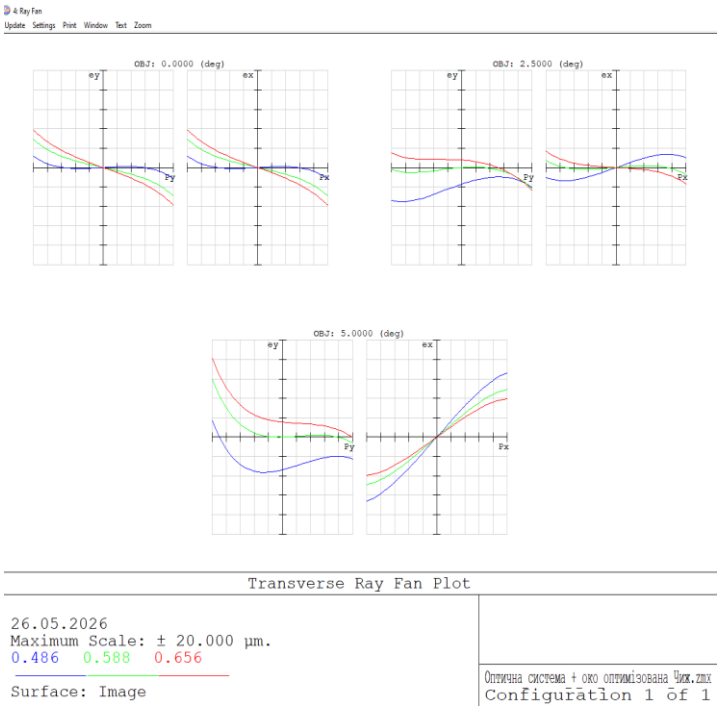


Рис. 2. 12 Графіки поперечних аберацій променів осьового і позаосьових пучків

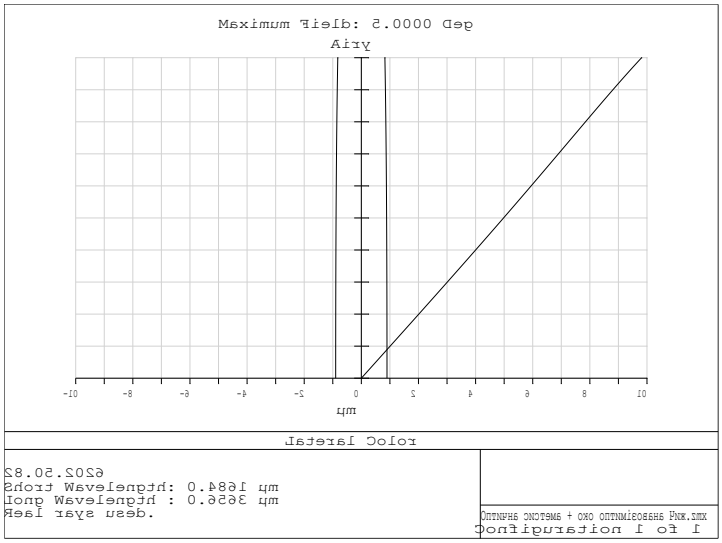


Рис. 2.13 Графік хроматизму збільшення оптичної системи монокуляра

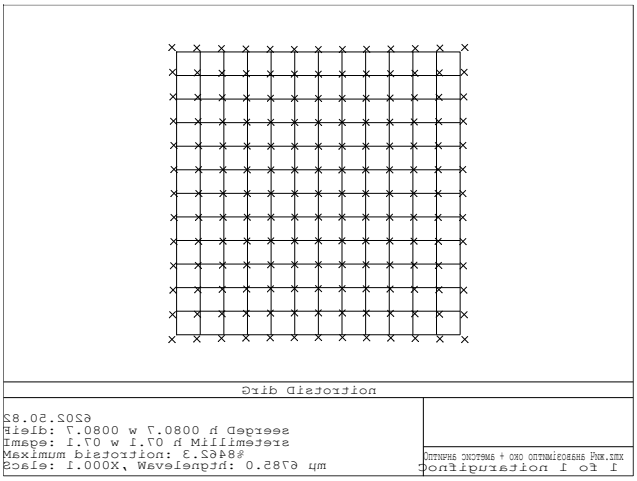


Рис. 2.14 Карта зображення квадратної гратки, спотвореного дисторсією

Висновки до Розділу 2

1. Результатом виконаних в цьому розділі робіт створено оптичну систему монокуляра, який за своїми габаритами і параксіальними параметрами відповідає вимогам Завдання даної випускної роботи.

2. Залишкові аберації оптичної системи знаходиться в межах допустимих, але остаточні висновки відносно можна зробити після встановлення перед

монокуляром зум-афокальної системи на варіолінзах, яка є задачею розробки в Розділі 3

РОЗДІЛ 3 КОМПАНОВКА І АНАЛІЗ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЗУМ-МОНОКУЛЯРА

Задачами даного розділу є:

1. Компоновка зум-афокальної системи Галілея на варіолінзах EL-16-40 та ML-20-37.
2. Аналіз параксіальних і аберацій них параметрів скомпонованої зум-афокальної системи.
3. Компоновка оптичної системи зум-монокуляра з аналізом її параксіальних і аберацій них параметрів і характеристик.
4. Опис функціональної схеми зум-монокуляра:
    - Функціональної схеми
    - Електричної системи керування оптичною силою варіолінз EL-16-40 з драйверами і програмним забезпеченням.
    - керування оптичною силою варіо-лінзи ML-20-37 (дуже коротко).
    -

3.1. Компоновка зум-афокальної системи Галілея на варіо-лінзах фірми Optotune EL-16-40 та ML-20-37

Зум-афокальні системи – це телескопічні пристрої за змінним кутовим збільшенням. Їх широко застосовують у трансфокаторах, розширювачах лазерних пучків та різноманітних сенсорах, що базуються на оптичних телескопічних системах [14].

У традиційних зум-афокальних системах, де використовуються оптичні компоненти з фіксованими значеннями оптичних сил, зміна кутового збільшення досягається шляхом переміщення компонентів уздовж оптичної осі за заданими залежностями. Для таких переміщень необхідні спеціальні механізми. У цьому матеріалі розглядаються можливості та умови для створення зум-афокальних систем, у яких оптичні компоненти залишаються нерухомими. Реалізація такого підходу передбачається за рахунок використання варіолінз.

Відомо, що телескопічні системи традиційно поділяються на два типи: системи Галілея та системи Кеплера. Системи Галілея у яких компоненти мають протилежні знаки оптичних сил, формують пряме (не перевернуте) зображення, що є їхньою суттєвою перевагою. Роль апертурної діафрагми в них відіграє вхідна зіниця об'єктива, розташованого за афокальною системою.

Ключовим недоліком систем Галілея є відсутність дійсного проміжного зображення. Через це неможливо встановити польову діафрагму, яка б забезпечила різке обмеження поля зору. Натомість поле зору обмежується віньєтною діафрагмою, тому воно не має різких меж. Як наслідок, за однакового кутового збільшення розмір поля зору системи Галілея значно поступається системам Кеплера [14].

Система Кеплера містять компоненти з позитивними оптичними силами, тому вони формують перевернуте зображення. Їхня перевага полягає в наявності дійсного проміжного зображення, у якому можна встановити польову діафрагму і тим самим забезпечити чітке обмеження поля зору. До того ж оправа одного з компонентів системи слугує апертурною діафрагмою. Це гарантує наявність власних вихідної та вхідної зіниць, незалежно від зовнішніх оптичних деталей [14].

З огляду на вказані відмінності, доцільно окремо аналізувати властивості зум-афокальних систем із нерухомими оптичними компонентами, що функціонують за схемою Галілея або за схемою Кеплера.

На рис. 3.1 показана телескопічна система Галілея, у якій перший компонент має позитивну оптичну силу ($\Phi_{1\text{var}} > 0$), а другий – від'ємну ($\Phi_{2\text{var}} < 0$)

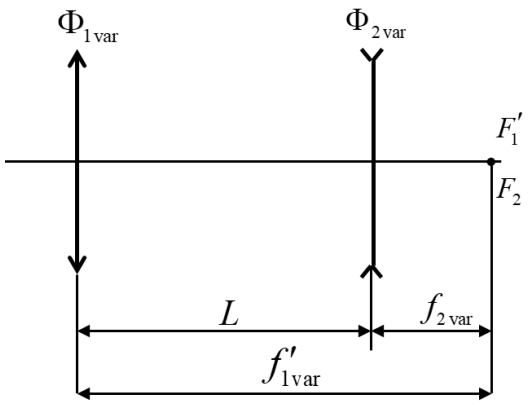


Рис. 3. 1 Зум-афокальна система за схемою Галілея [15]

З рис. 3.1 видно, що:

$$L = f'_{1\text{var}} - f'_{2\text{var}} = f'_{1\text{var}} + f'_{2\text{var}} = \frac{1}{\Phi_{1\text{var}}} + \frac{1}{\Phi_{2\text{var}}} \tag{3.1}$$

Кутове збільшення афокальної системи [2]:

$$\gamma = -\frac{f'_{1\text{var}}}{f'_{2\text{var}}} = -\frac{\Phi_{2\text{var}}}{\Phi_{1\text{var}}} \tag{3.2}$$

Система, складається з рівнянь (3.1) та (3.2), має розв’язок відносно оптичних сил компонентів [2]:

$$\Phi_{1\text{var}} = \frac{\gamma - 1}{\gamma L} \tag{3.3}$$

$$\Phi_{2\text{var}} = \frac{\gamma - 1}{L} \tag{3.4}$$

У діоптріях оптичні сили цих компонентів становлять [15]:

$$\Phi_{1\text{var}}[dptr] = \frac{1000(\gamma - 1)}{\gamma L}, \qquad \Phi_{2\text{var}}[dptr] = \frac{1000(1 - \gamma)}{L}$$

На рис. 3.2 наведені графіки залежностей $\Phi_{1\text{var}}(\gamma)$ та $\Phi_{2\text{var}}(\gamma)$, отримані для різних значень осьової довжини L. Якщо зум-афокальна система Галілея побудована на базі двох ідентичних варіолінз Optoutune ML-20-37 із робочим діапазоном оптичної сили ± 18 дптр, то максимально досяжні значення кутового збільшення визначатимуться осьовою довжиною системи. Як випливає з формул (3.3), (3.4) та графіків на рис 3.2, розширити діапазон кутового збільшення можна за рахунок збільшення осьової довжини системи, а також застосуванням варіолінз із більш ширшим робочим діапазоном оптичних сил.

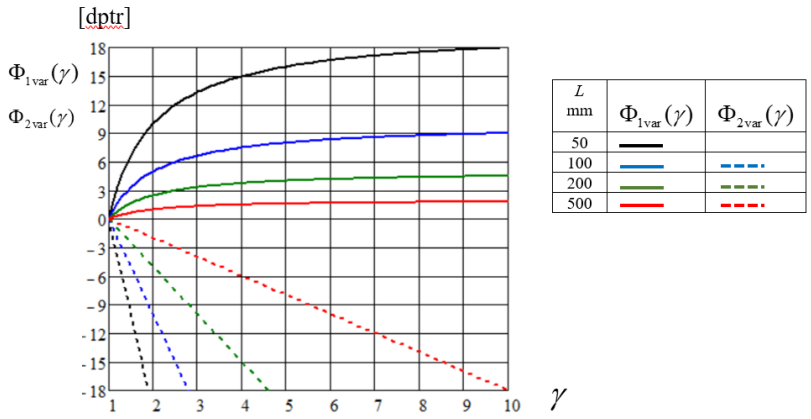


Рис. 3. 2 Графіки залежності оптичних сил варіолінз від кутового збільшення системи Галілея при різних значеннях її осьової довжини [15]

У галілеївських системах поле зору обмежується розмірами віньєтної діафрагми. Її роль переважно виконує оправа першої лінзи (першого компонента). Якщо ж за афокальною системою розмістити фіксований об'єктив, оправа якого працюватиме як апертурна діафрагма (STOP), то кутовий розмір поля зору системи в просторі (у радіанах) можна розрахувати за двома сценаріями [15]:

1) За умови відсутності він'єтування по полю зору [15]:

$$2\omega[rad] = 2arctg\frac{\varnothing_1 - \gamma\varnothing_{STOP}}{2\gamma(\gamma t' + L)} \quad (3.5)$$

2) За умови повного він'єтування поза межами поля зору [15]:

$$2\omega[rad] = 2arctg\frac{\varnothing_1 + \gamma\varnothing_{STOP}}{2\gamma(\gamma t' + L)} \quad (3.6)$$

де:

1) $\varnothing_1$ - світловий діаметр першого компонента;

2) t' - відстань від апертурної діафрагми (STOP) до другого компонента системи Галілея.

З рівнянь (3.5) та (3.6) випливає закономірність: якщо діаметр першого компонента $\varnothing_1$ та діаметр апертурної діафрагми $\varnothing_{STOP}$ є фіксованими, то будь-яке збільшення осьової довжини L або кутового збільшення γ неминуче призводитиме до звуження поля зору системи.

Оскільки зум-монокуляр повинен забезпечувати пряме зображення, то зум-афокальну система також повинна давати пряме зображення, тобто мати структуру за типом системи Галілея.

3.1.1 Відтворення конструктивних параметрів варіолінз на базі вихідних даних від фірми Optotune

Оскільки світловий діаметр об'єктиву, вона ж і вхідна зіниця монокуляра, 12 мм, то ясно, що світлові діаметри варіолінз повинні бути того ж розміру і більше.

Електрозмочувальні лінзи мають суттєво менші світлові діаметри, тому для створення зум-афокальної системи придатними є мембранні варіолінзи моделей EL-16-40 та ML-20-37, у яких світлові діаметри та діапазони оптичної сили.

Таблиця 3.1 Зовнішні параметри мембранних варіо-лінз [13]

Модель	Ф, мм	Ф [дптр]
EL-16-40	16	-2…+3
ML-20-37	20	-18…+18

З графіків на рис. 3.2 видно, що в діапазоні $\gamma \in [1\ldots3]$ перший компонент зум-афокальної системи:

– повинен змінювати оптичну силу від нуля в сторону позитивних (додатніх) значень,

-другий компонент – від нуля і далі на від'ємні значення оптичної сили. Тому для першої лінзи потрібно використати модель EL-16-40, для другої – модель ML-20-37.

Оскільки осьовий габарит в тонких компонентах монокуляра складає не менш як $L_{мон.} = f'_{об} + 2f'_{ок} = 100 + 2 \cdot 25 = 150$ мм, а загальний габарит з умов завдання ≤ 350 мм, то на зум-афокальну систему залишається $350 - 150 = 200$ мм.

Якщо осьовий габарит зум-афокальної системи L=200 мм., то згідно формул (3.3), (3.4) в діоптріях оптична сила першої варіолінзи повинна змінюватися в діапазон:

$$\Phi_{1\text{var}}[\partial nmp]=\frac{1000\cdot(\gamma-1)}{\gamma L}\Bigg|_{\substack{\gamma=1\\ \gamma=3\\ L=200}}=5\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)\Bigg|_{\substack{\gamma_1=1\\ \gamma=3}}=[0...3{,}33];$$

а друга варіолінза – в діапазоні:

$$\Phi_{2\text{var}}[\partial nmp]=\frac{1000\cdot(1-\gamma)}{L}\Bigg|_{\substack{\gamma=1\\ \gamma=3\\ L=200}}=5(1-\gamma)=[0...-10]_{\partial nmp}.$$

3.1.1 Відтворення конструктивний параметрів варіолінз на базі вихідних даних від фірми Optotune.

Відтворення конструктивних параметрів моделі EL-16-40

Для відтворення конструктивних параметрів моделі EL-16-40 використовуємо вихідні дані, отримані від виробника.

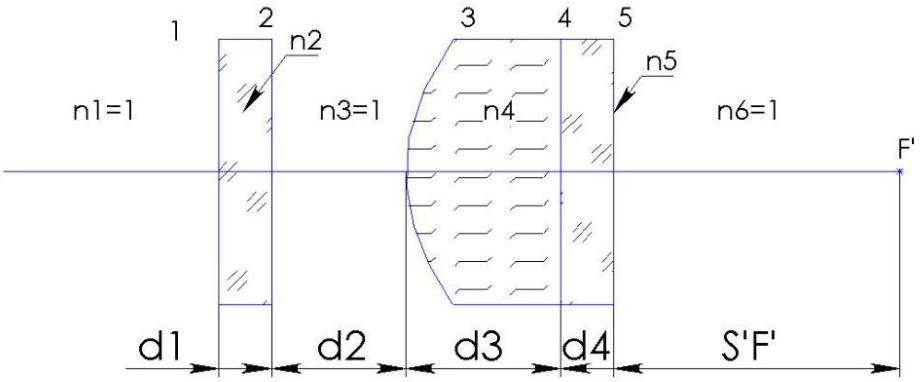


Рис. 3. 3 Оптична схема моделі EL-16-40

Таблиця 3.2 Конструктивні параметри варіо-лінзи EL-16-40 [12]

Радіуси кривизни	Осьові відстанні	Матеріал
$r_1 = \infty$		повітря
$r_2 = \infty$	$d_1 = 0,5$	D263TECO
$r_3 = r_3(\Phi_{1var})$	$d_2 = d_2(\Phi_{1var})$	повітря
$r_4 = \infty$	$d_3 = d_3(\Phi_{1var})$	OL1224_VIS
$r_5 = \infty$	$d_4 = 0,5$	D263TECO
		повітря

В режимі мультіконфігурації ця варіолінза має параметри (від виробника), представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 Параметри варіолінзи в режимі мультіконфігурації [12]

Опична сила Ф в діоптріях	d2 (мм)	d3 (мм)	r3 (мм)
-4,55	4,887	2,443	-63,995
-2,006	4,569	2,761	-145,128
0,498	4,258	3,072	585,206
1,480	4,136	3,194	196,67
2,157	3,952	3,378	98,335
5,362	3,651	3,679	54,295

Ці дані дозволяють методом регресії в Mathcad здійснити апроксимацію функцій $d_2 = d_2(\Phi_{1var}), d_3 = d_3(\Phi_{1var})$, які потім можна використовувати для моделювання зум-афокальної системи в ZEMAX в режимі мультіконфігурації під систему, яка розробляється.

Процедура отримання функцій $d_2 = d_2(\Phi_{1var})$ і $d_3 = d_3(\Phi_{1var})$ демонструється далі фрагментами файлів з Mathcad:

Математичним апаратом для розв'язання цієї задачі слугує поліноміальна регресія 4-го порядку (ступінь полінома k=4). Загальний вигляд шуканої функції

можна описати рівнянням:

$$d(\Phi) = a_0 + a_1\Phi + a_2\Phi^2 + a_3\Phi^3 + a_4\Phi^4$$

Як вектори вхідних даних було використано табличні значення Ф, $d_2(\Phi)$ та $d_3(\Phi)$ (табл. 3.3). Розрахунок коефіцієнтів полінома здійснюється за допомогою вбудованих функцій MathCad:

1) $regress(\Phi, d_2(\Phi), k)$ – функція що обчислює вектор коефіцієнтів S для побудови регресійного полінома ступеня k на основі масивів вхідних даних.
2) $\text{int}erp(s, d_2(\Phi), \Phi, t)$ - функція, що повертає інтерпольовані значення для будь-якого довільного значення оптичної сили t на основі знайденого вектора коефіцієнтів S.

Загальний вигляд обрахунку буде таким:

Апроксимація КП варіолинзи EL-16-40

поліноміальна регресія

$$\Phi := \begin{pmatrix} -4.55 \\ -2.006 \\ 0.498 \\ 1.480 \\ 2.157 \\ 5.362 \end{pmatrix} \quad d2(\Phi) := \begin{pmatrix} 4.887 \\ 4.569 \\ 4.258 \\ 4.136 \\ 3.952 \\ 3.651 \end{pmatrix} \quad d3(\Phi) := \begin{pmatrix} 2.443 \\ 2.761 \\ 3.072 \\ 3.194 \\ 3.378 \\ 3.679 \end{pmatrix}$$

$k := 4$

$S := regress(\Phi, d2(\Phi), k)$

$A(t) := interp(s, d2(\Phi), \Phi, t$

$$S = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 4 \\ 4.35181 \\ -0.1417 \\ -0.02006 \\ 1.33905 \times 10^{-4} \\ 7.4361 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$d22(\Phi) := 4.35181 - 0.1417 \cdot \Phi - 0.02006 \cdot \Phi^2 - 0.0001334 \cdot \Phi^3 + 0.0007 \cdot \Phi^4$

У результаті обробки даних було розраховано числові значення коефіцієнтів $a_0 ... a_4$, що дозволило отримати такі підсумкові аналітичні залежності:

Для товщини другої поверхні:

$$d_2(\Phi) = 4,35181 - 0,1417 \cdot \Phi - 0,02006 \cdot \Phi^2 + 0,0001334 \cdot \Phi^3 + 0,0007 \cdot \Phi^4$$

Для товщини третьої поверхні:

$$d_3(\Phi) = 2,97819 + 0,1417 \cdot \Phi + 0,02006 \cdot \Phi^2 - 0,0001334 \cdot \Phi^3 - 0,00074 \cdot \Phi^4$$

Де Ф – поточне значення оптичної сили варіолінзи, виражене в діоптріях(дптр.), $d_2(\Phi)$ та $d_3(\Phi)$ - розрахункові значення осьових товщин лінзи, виражені в міліметрах (мм.).

Графічний на рис. 3.4 підтверджують високу точність апроксимації. На графіках криві безперервних функцій $d_2(\Phi)$ та $d_3(\Phi)$ (суцільно червоні лінії) ідеально проходять через вузлові точки дискретних вихідних даних від виробника (сині маркери у вигляді хрестиків). Такий ступінь збігу свідчить про те, що поліном 4-го порядку забезпечує достатню точність апроксимації для мінімізації розрахункових похибок під час подальшого трасування променів та оптимізації системи в Zemax.

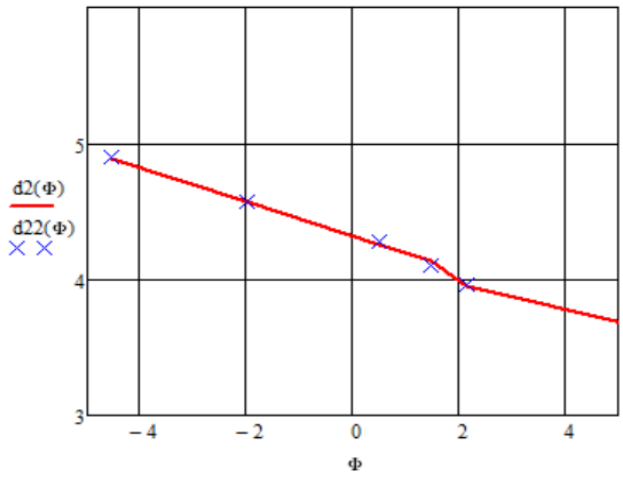


Рис. 3. 4 Апроксимація товщини d_2 для лінзи EL-16-40

Оскільки залежність геометричних параметрів від оптичної сили в цій моделі має складніший нелінійний характер, для апроксимації товщини d_3 було також застосовано математичний апарат поліноміальної регресії 4-го порядку (k=4):

За допомогою функції regress на основі масиву табличних даних $d_3(\Phi)$ було розраховано відповідний вектор коефіцієнтів S. Це дозволило вивести підсумкове аналітичне рівняння для безперервного розрахунку товщини третьої поверхні:

$$d_3(\Phi) = 2{,}97819 + 0{,}1417 \cdot \Phi + 0{,}02006 \cdot \Phi^2 - 0{,}0001339 \cdot \Phi^3 - 0{,}00074361 \cdot \Phi^4$$

```
k := 4
S := regress(Φ, d3(Φ), k)
A(t) := interp(s, d3(Φ), Φ, t)
```

```
k := 4
S := regress(Φ, d3(Φ), k)
A(t) := interp(s, Φ, d3(Φ), t
```

$$S = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 4 \\ 2.97819 \\ 0.1417 \\ 0.02006 \\ -1.33905 \times 10^{-4} \\ -7.4361 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$d33(\Phi) := 2.97819 + 0.1417 \cdot \Phi + 0.02006 \cdot \Phi^2 - 0.0001339 \cdot \Phi^3 - 0.00074361 \cdot \Phi^4$$

Графіки на рис. 3.5 підтверджують високу точність апроксимації. На графіку чітко видно, що розрахункова крива (червона суцільна лінія) ідеально проходить через усі вузлові точки дискретних вихідних даних від виробника (сині маркери).

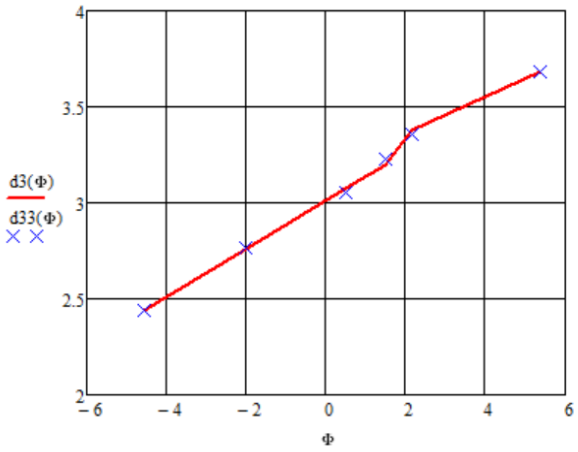


Рис. 3. 5 Апроксимація товщини d_3 для лінзи EL-16-40

Наявність обох математично описаних функцій гарантує, що при трасуванні променів у Zemax програмна зможе коректно та безперервно перебудовувати конструктивні параметри варіо-лінзи EL-16-40 для будь-якого заданого кутового збільшення зум-афокальної системи.

Залежність радіуса $r_3 = r_3(\Phi_{1var})$ відтворена в середовищі програми ZEMAX

методом оптимізації, ціль якої отримати конкретні значення Ф варіолінзи, при якому зум-афокальна система забезпечує потрібне значення γ із ряду.

$\gamma = 1;1,5;2,0;2,5;3,0$

При цих значеннях згідно попередніх формул.

Таблиця 3.4 Значення оптичних сил варіолінз EL-16-40, ML-20-37 при заданих значеннях кутового збільшення зум-афокальної системи.

γ	1	1,5	2,0	2,5	3,0
EL-16-40 $\Phi_{1var}(\gamma)_{дптр}$	0	1,(6)	2,5	3,0	3,(3)
ML-20-37 $\Phi 2_{var}(\gamma)_{дптр}$	0	-2,5	-5	-7,5	-10

При цих значеннях оптичних сил радіус $r_3 = r_3(\Phi_{1var})$:

Таблиця 3.5 Значення конструктивних параметрів варіо-лінзи EL-16-40 при заданих значеннях кутового збільшення зум-афокальної системи

γ	$\Phi_{2var}[дптр]$	d_2	d_3	$r_3[мм]$	$S'_{F'}[мм]$
1	0	4,3518	2,978	∞	-
1,5	1,66666	4,065	3,2637	174,700	597,145
2,0	2,5	3,897	3,4267	116,467	397,017
2,5	3,0	3,799	3,520	97,056	330,28
3,0	3,3333…	3,738	3,5766	87,350	296,90

Відтворення конструктивних параметрів лінзи ML-20-37

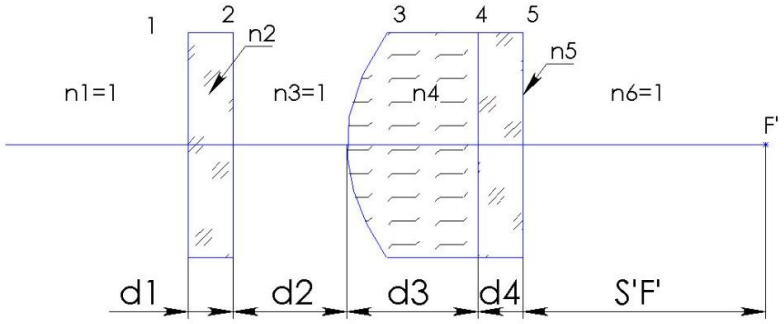


Рис. 3. 6 Оптична схема варіо-лінзи ML-20-37

Таблиця 3.6 Конструктивні параметри лінзи ML-20-37

Радіуси кривизни	Осьові відстанні	Матеріал
$r_1=\infty$		$n_1=1$ (повітря)
$r_2=\infty$	$d_1=1,0$	$n_2=1,5168$ (BK7)
$r_3=(\Phi_{2var})$	$d_2=(\Phi_{2var})$	$n_3=1$ (повітря)
$r_4=\infty$	$d_3=(\Phi_{2var})$	$n_4=1,382272$ (*) $\nu=64,8$
$r_5=\infty$	$d_4=0,5$	$n_5=1,5168$
		$n_6=1$ (повітря)

Таблиця 3.7 Дані від виробника:

Φ_{2var}[дптр]	d_2	d_3
-19,427	6,905	1,457
0	4,176	3,133
+15,617	2,039	4,519

За цими трьома даними функції $d_2=d_2(\Phi_{2var})$ і $d_3=d_3(\Phi_{2var})$ були методом регресії апроксимовані в Mathcad.

За аналогічним методом що і для варіо-лінзи EL-16-40 було здійснено математичну апроксимацію параметрів для другої варіо-лінзи, що входить до

складу системи – моделі ML-20-37.

Використовуючи вже описаний раніше математичний апарат середовища MathCad (вбудовані функції regress та interp), дискретні дані від виробника були перетворені на безперервну аналітичну залежність.

На відміну від попереднього випадку (де використовувався поліном 4-го порядку), масив даних від виробника для лінзи ML-20-37 є суттєво обмеженим, тому в цьому випадку для поліноміальної апроксимації можна використати поліном не більш 2-го порядку (k=2).

Алгоритм апроксимації методом регресії у середовищі MathCad:

Апроксимація КП варіолинзи ML-20-37

поліноміальна регресія

$$\Phi := \begin{pmatrix} -19.427 \\ 0 \\ 15.617 \end{pmatrix} \qquad d2(\Phi) := \begin{pmatrix} 6.905 \\ 4.176 \\ 2.039 \end{pmatrix} \qquad d3(\Phi) := \begin{pmatrix} 1.457 \\ 3.133 \\ 4.519 \end{pmatrix}$$

$k := 2$

$S := regress(\Phi, d2(\Phi), k)$

$A(t) := interp(s, d2(\Phi), \Phi, t)$

$$S = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ 4.176 \\ -0.13846 \\ 1.03771 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$d22(\Phi) := 4.176 - 0.13846 \cdot \Phi + 0.00010377 \cdot \Phi^2$$

За результатами обчислень векторів коефіцієнтів, було отримано підсумкове квадратичне рівняння для визначення осьової товщини другої поверхні d_2 залежно від оптичної сили Ф:

$$d_2(\Phi) = 4{,}176 - 0{,}13846 \cdot \Phi - 0{,}0001038 \cdot \Phi^2$$

Графічна перевірка отриманих результатів (рис. 3.7) підтверджує коректність обраної математичної моделі.

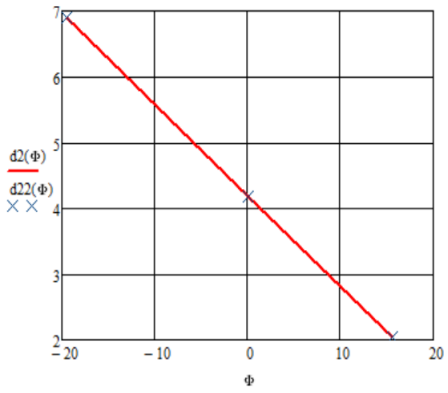


Рис. 3. 7 Апроксимація товщини d_2 для лінзи ML-20-37

Аналогічним чином для повного опису геометрії варіолінзи ML-20-37 у режимі мультиконфігурації, було виконано апроксимацію товщини наступного конмпонента - d_3.

Використовуючи той самий математичний апарат поліноміальної регресії 2-го порядку (k=2), на основі масиву вхідних даних $d_3(\Phi)$ було розраховано відповідні апроксимаційні коефіцієнти.

Алгоритм апроксимації у середовищі MathCad :

$k := 2$

$S := regress(\Phi, d3(\Phi), k)$

$A(t) := interp(s, d3(\Phi), \Phi, t)$

$$S = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ 3.133 \\ 0.08765 \\ 7.07041 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$d33(\Phi) := 3.133 + 0.08765 \cdot \Phi + 0.00000707 \cdot \Phi^2$$

В результаті отримано аналітичну залежність, яка описує зміну товщини третьої поверхні від оптичної сили:

$$d_3(\Phi) = 3{,}133 + 0{,}08765 \cdot \Phi + 0{,}0000707 \cdot \Phi^2$$

Графік функцій $d_3(\Phi)$ також демонструє високий ступінь збігу розрахункової кривої з дискретними даними виробника (сині маркери на графіку). Наявність обох безперервних функцій - $d_2(\Phi)$ та $d_3(\Phi)$ дозволяє максимально точно відтворити конструктивні зміни варіо-лінзи ML-20-37 у

середовищі Zemax при будь-якому значенні її оптичної сили.

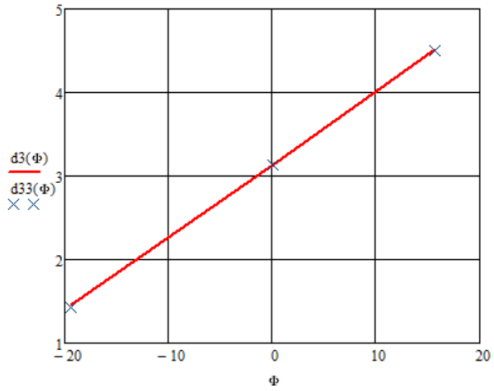


Рис. 3. 8 Апроксимація товщини d_3 для лінзи ML-20-37

При такому вигляді цих функцій конструктивні параметри лінзи мають значення:

Таблиця 3.7 Значення конструктивних параметрів варіо-лінзи ML-20-37 при заданих значеннях кутового збільшення зум-афокальної системи

x $\Phi_{2\text{var}}$ дптр	$d_2 = d_2(\Phi_{2\text{var}})$, мм	$d_3 = d_3(\Phi_{2\text{var}})$, мм	$r_3 = r_3(\Phi_{2\text{var}})$ мм	$S'_{F'}$, мм
0	4,176	3,133	∞	∞
-2,5	4,523	2,914	-152,909	-402,4374
-5,0	4,871	2,695	-76,454	-202,2783
-7,5	5,22	2,476	-50,969	-135,453
-10,0	5,571	2,257	-38,277	-101,962

Радіус $r_3 = r_3(\Phi_{2\text{var}})$ отриманий аналогічно попередній лінзі в середовищі програми Zemax методом оптимізації при вище вказаних в таблиці значень $\Phi_{2\text{var}}(\gamma)$.

3.1.2 Компоновка зум-афокальної системи Галілея на варіо-лінзах фірми Optotune EL-16-40 та ML-20-37

З попереднього аналізу робочого діапазону оптичних сил варіо-лінз, які

повинні виконувати функції першого і другого компонента системи Галілея випливає, що такі можливості для першого компонента має варіолінза EL-16-40, для другого – варіолінза ML-20-37.

Показано, що між половними площинами компонентів відстань L_0 повинна складати 200 мм.

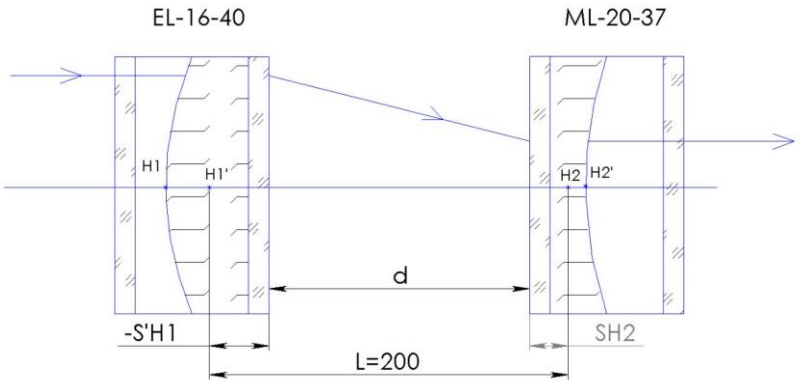


Рис. 3. 9 Оптична схема зум-афокальної системи Галілея на базі варіо-лінз EL-16-40 та ML-20-37 із зазначенням головних площин (L=200)

Для забезпечення відстані L=200 мм потрібно враховувати відрізкі - S'_{H_1}, d, S_{H_2}.

Відрізки S'_{H_1} і S_{H_2} при зміні оптичної сили лінз Φ можуть змінюватися, тому для першого наближення їх треба відтворити при умові, що Φ_1 і Φ_2 забезпечують зум-афокальній системі максимальне задане кутове збільшення $\gamma = 3$ при цьому зум-монокуляр має кутове збільшення $\gamma_M = 3 \cdot 4 = 12$.

Використовуючи дані про конструктивні параметри варіо-лінз в програмі ZEMAX знаходимо відрізки - S'_{H_1} і S_{H_2}.

Лінза EL-16-40 при $\gamma = 3$ має $\Phi_{1\text{var}} = 3,(3)$ дптр, тоді її конструктивні параметри, табл. 3.8 :

Таблиця 3.8

Радіуси кривизни, мм	Осьові відстані, мм
$r_1 = \infty$	
$r_2 = \infty$	$d_1 = 0,5$
$r_3 = 87,35$	$d_2 = 3,738$
$r_4 = \infty$	$d_3 = 3,577$
$r_5 = \infty$	$d_4 = 0,5$

Отримані в Zemax кардинальні відрізки варіолінзи EL-16-40 мають значення:

$$-f_1 = f_1' = 300 мм.$$

$$S'_{F'} = 296,9017$$

$$S'_{H_1'} = S'_{F'} - f' = 296,9017 - 300 = -4,066(мм)$$

Варіолінза ML-20-37 в тому положенні, яке показано на рис. 3.4, при кутовому збільшенні монокуляра $\gamma_M = 12$ і кутовому збільшенні зум-афокальної системи $\gamma = 3$ повинна мати оптичну силу $\Phi_{2\,\text{var}} = -10$ дптр і мати положення, показане на рис. 3.10.

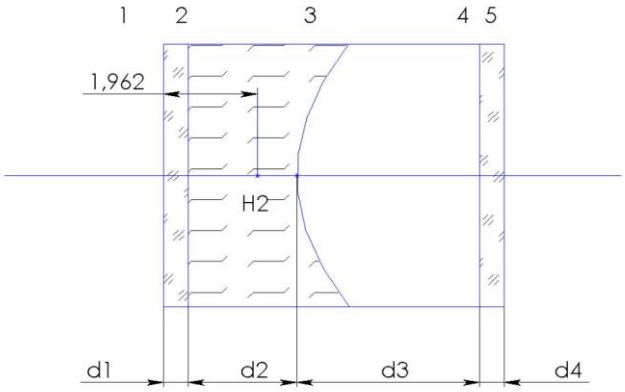


Рис. 3. 10 Оптична схема повернутої варіо-лінзи ML-20-37

Тут (рис. 3.4) варіо-лінза ML-20-37 повернута на 180° по відношенню до того положення, яке розглядалося вище. Це зроблено з умови мінімізації сферичної аберації. Тому за пласким склом знаходиться рідина, потім повітря як

і показано на рис. 3.10. При оптичній силі $\Phi_{2\text{var}} = -10$ дптр конструктивні параметри ML-20-37 згідно попередньої апроксимації мають значення, табл. 3.9:

Таблиця 3.9

Радіус (r_i)	Товщина (d_i)	Показник заломлення (n_i)
-	-	$n_1=1$
$r_1=\infty$	$d_1=0{,}5$	$n_2=1{,}5168$
$r_2=\infty$	$d_2=2{,}257$	$n_3=1{,}382272$
$r_3=38{,}277$	$d_3=5{,}571$	$n_4=1$
$r_4=\infty$	$d_4=1$	$n_5=1{,}5168$
$r_5=\infty$	-	$n_6=1$

Відрізок S_{H_2}, що вказує положення передньої головної точки H_2 лінзи ML-20-37 в її робочому положенні в зум-афокальній системі (рис. 3.4) отримано в Zemax.

$$S_{H_2} = 1{,}962 мм.$$

Маючи дані про кардинальні відрізки - $S'_{H'_1}$ і S_{H_2} можна розрахувати відрізок d, рис. 3.9, який встановлює відстань між точкою H'_1 і H_2 варіолінз, при якій зум-афокальна система Галілея становиться телескопічною.

Із рис. 3.9 маємо рівняння відрізків:

$$-S'_{H'_1} + d + S_{H_2} = L, \text{ з якого}$$

$$d = L - S_{H_2} + S'_{H'_1} = 200 - 1{,}962 + (-4{,}066) = 193{,}972$$

На рис. 3.9 показано оптичну зум-афокальну систему по Галілею, яка при конструктивних параметрах, що показані в таблиці 3.8, забезпечує кутове збільшення $\gamma = 3$.

3.2. Аналіз в режимі мультиконфігурації параксіальних і абераційних параметрів і характеристик скомпонованої зум-афокальної системи.

Режим мультиконфігурації являє собою спеціальний підхід до комп'ютерного моделювання, який передбачає представлення оптичної системи в її різних робочих станах. За таких умов оптична модель будується таким чином, що в кожному окремому стані вона має відмінні специфічні для цієї конфігурації значення основних конструктивних параметрів, що дозволяє всебічно оцінити її функціональні параметри і характеристики.

У зум-афокальній системі, що аналізується в рамках даного проєкту, в якості головних змінних параметрів виступають радіуси поверхні, яка безпосередньо розділяє оптичні середовища в середині варіолінз. Окрім цього, до змінних величин належать відповідні осьові відстані – d_1, d_2. Саме ці геометричні параметри визначають і вказують на поточне змінне просторове положення тієї сферичної поверхні, яка розмежовує оптичні середовища безпосередньо всередині варіо-лінзи в процесі її переналаштування.

Зважаючи на те, що згідно з умовами роботи системи, зміна загального кутового збільшення має обов'язково відбуватися у заданому інтервалі значень від 1 до 3, для оптимізації розрахунків доцільно представити систему для декількох опорних дискретних значень. Таким чином, для проведення більш детального аналізу зафіксуємо наступні контрольні точки кутового збльшення: γ = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0.

Таблиця 3.10 Конструктивні параметри зум-афокальної системи при $\gamma = 3$

№ строки в ред.	Параметри, що змінюються			γ-кутове збільшення				
	В лінзі	В зум-системі		1	1,5	2,0	2,5	3,0
		К П	операнд					

Продовження таблиці 3.10

2	EL-16-40	$d_2 =$	d_2	THIC 2	4,352	4,065	3,897	3,799	3,738
3		$r_3 =$	r_3	CRVT 3	∞(0)	+174,7 (0,00572)	+116,467 (0,008586)	+97,056 (0,010303)	+87,35 (0,011448)
3		$d_3 =$	d_3	THIC 3	2,978	3,264	3,427	3,520	3,577
7	ML-20-37	$d_2 =$	d_2	THIC 7	3,133	2,914	2,695	2,476	2,257
8		$r_3 =$	r_3	CRVT 8	∞(0)	+152,909 (0,00654)	+176,454 (0,001308)	+50,969 (0,01962)	+38,277 (+0,0026125)
8		$d_3 =$	d_3	THIC 8	4,176	4,523	4,871	5,22	5,571

Зафіксувавши зазначені дискретні значення конструктивних параметрів, отримуємо п’ять окремих робочих конфігурацій зум-афокальної системи. Візуальне та табличне представлення цих розрахункових станів у редакторі мультиконфігурацій програмного середовища оптичного моделювання Zemax має наступний вигляд:

Multi-Configuration Editor

Edit Solves Tools View Help

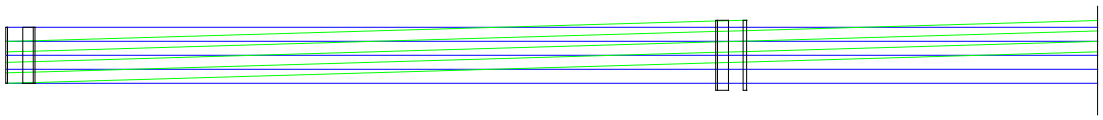
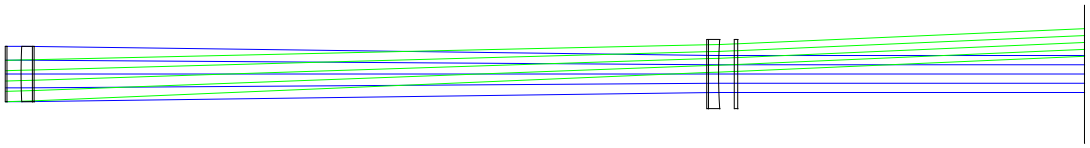
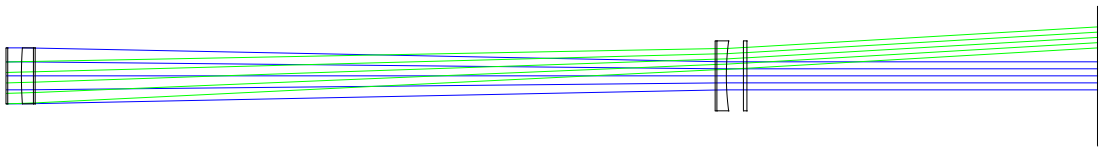
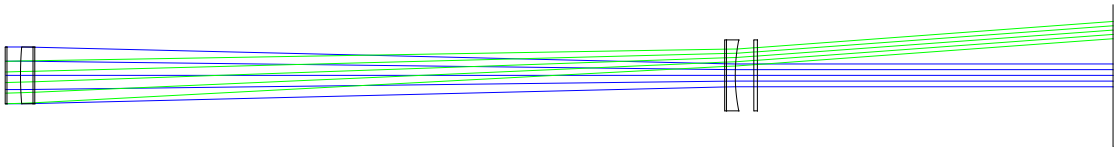
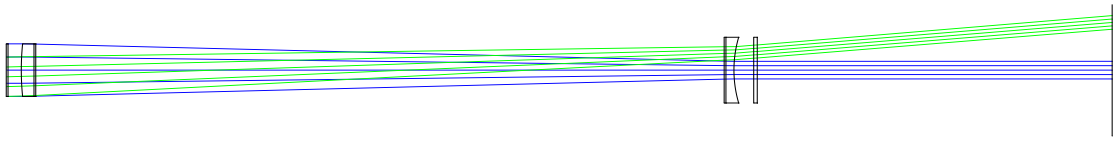
Active : 5/5		Config 1	Config 2	Config 3	Config 4	Config 5*
1: MOFF	0	Γ=1	Γ=1.5	Γ=2	Γ=2.5	Γ=3
2: THIC	2	4.352	4.065	3.897	3.799	3.738
3: CRVT	3	0.000	5.720E-003	8.586E-003	0.010	0.011
4: THIC	3	2.978	3.264	3.427	3.520	3.577
5: THIC	7	3.133	2.914	2.695	2.476	2.257
6: CRVT	8	0.000	6.540E-003	0.013	0.020	0.026
7: THIC	8	4.176	4.523	4.871	5.220	5.571

У таблиці 3.9 детально відображено особливості функціонування досліджуваної зум-афокальної системи в процесі зміни її базових конструктивних параметрів згідно з даними, що були попередньо наведені в таблиці 3.8.

На основі комплексного аналізу представлених результатів моделювання можна зробити однозначний висновок про те, що світловий пучок променів

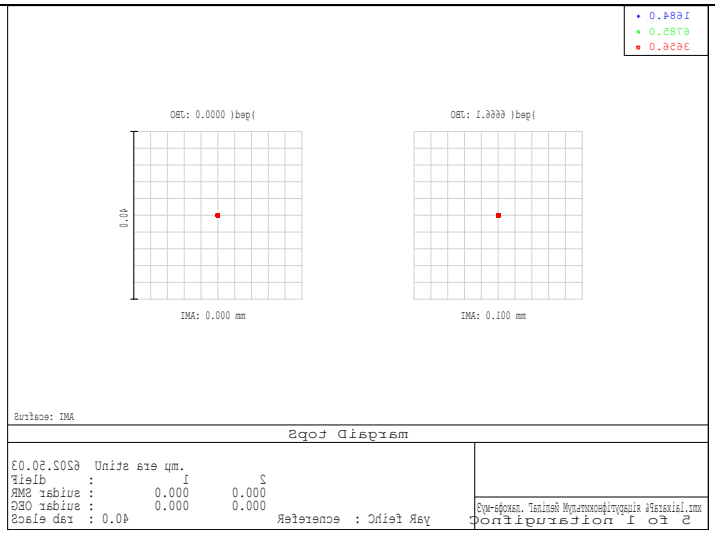
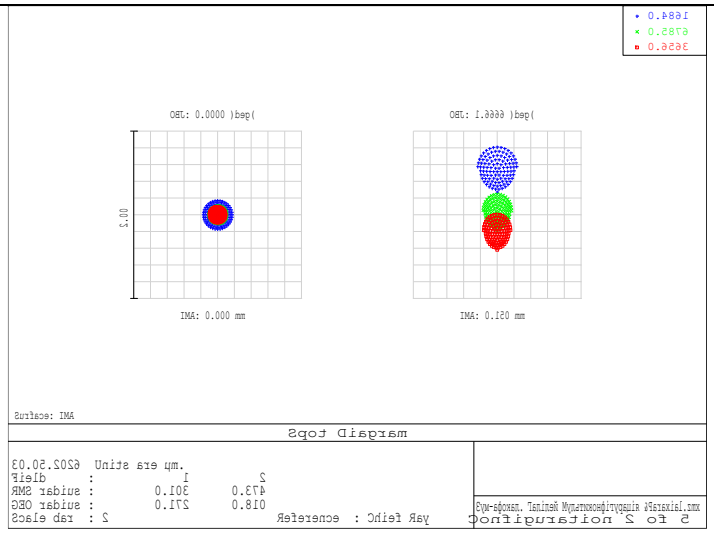
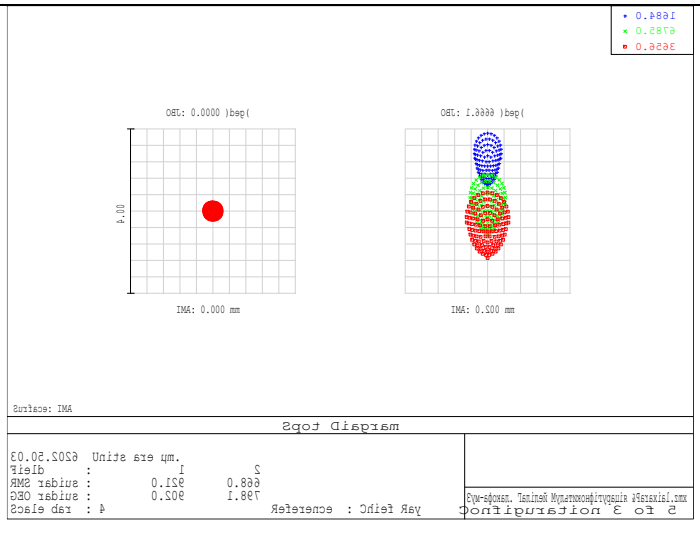
безпосередньо на виході з оптичної системи стабільно зберігає паралельність у кожній із заданих конфігурацій. Цей важливий оптичний ефект є прямим підтвердженням коректної роботи спроектованого пристрою та надійно свідчить про безперервне збереження властивості його телескопічності в усьому робочому діапазоні зміни кутового збільшення.

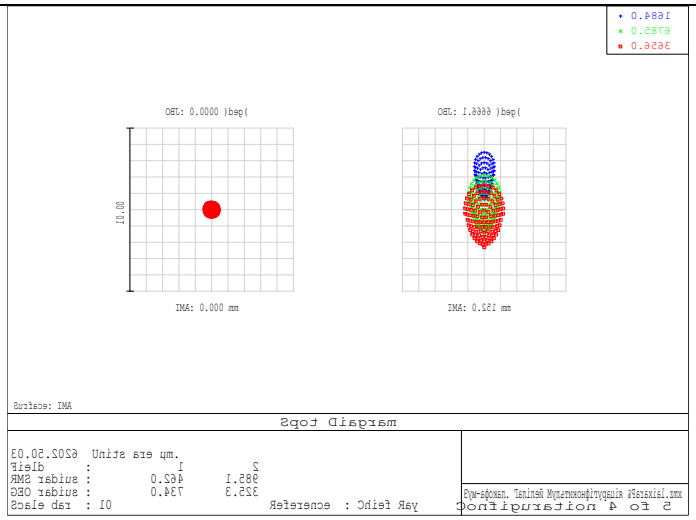
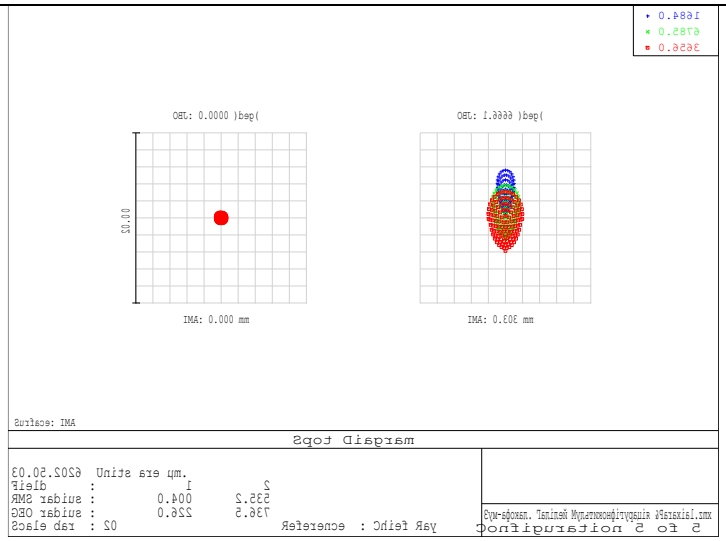
Таблиця 3.9 Хід променів в зум-афокальній системі пучка паралельних променів, який при всіх конфігураціях системи входить в неї під кутом $\omega = 1.5^o$ до оптичної.

$\gamma = 1$	
$\gamma = 1.5$	
$\gamma = 2.0$	
$\gamma = 2.5$	
$\gamma = 3.0$	

З огляду на афокальність досліджуваної системи, для коректної візуалізації її залишкових аберацій використано параксіал-компонент – віртуальну безаберацийну лінзу. У таблиці 3.10 представлено відповідні спот-діаграми, побудовані у фокальній площині цього допоміжного параксіального компонента, фокусна відстань якого становить 3,437 мм.

Таблиця 3.10 Спот-діаграми зум-афокальної системи

$\gamma = 1$		
$\gamma = 1.5$		
$\gamma = 2$		

$\gamma = 2.5$	
$\gamma = 3$	

Аналіз спот-діаграм, наведених у таблиці 3.10, дозволяє оцінити корекцію аберацій оптичної системи. Як свідчать результати моделювання, для точки на оптичній осі у всьому заданому діапазоні зміни кутового збільшення геометричний радіус аберраційної плями на спот-діаграмах не перевищує 0,62 кутової хвилини. Розміри аберраційних плям свідчать про невеликі сферичну аберацію системи та хроматизм положення.

Водночас, розміри спот-діаграми для позаосьових пучків променів демонструють закономірне зростання залишкових аберацій на краю поля зору. За специфічною асиметричною формою та характером розподілу точок у цих периферійних аберраційних плямах можна зробити висновок про наявність нескомпенсованих польових аберацій. Зокрема, візуальна картина розсіяння

променів чітко ідентифікує присутність коми, астигматизму, а також хроматизму збільшення.

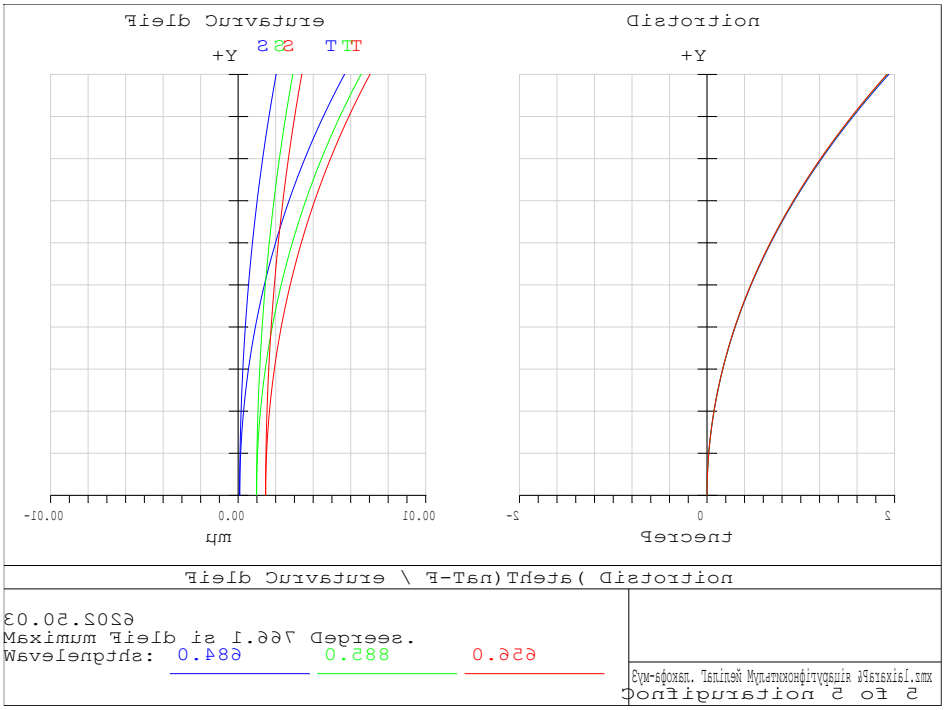


Рис. 3. 11 Графіки астигматизму і дисторсії зум-афокальної системи при $\gamma = 3$

Розгляд графіків астигматизму та дисторсії, наведених на рисунку 3.11, також свідчить про наявність викривлення поверхні зображення, що зумовлено аберацією кривизни поля. При цьому додатне значення радіуса кривизни на оптичній осі прямо вказує на те, що поверхня найкращого зображення набуває характерної опуклої форми.

Відстань між відповідними кривими вздовж горизонтальної осі ілюструє величину поздовжньої хроматичної аберації, яка в досліджуваній системі є доволі малою і не перевищує 1,5 кутової хвилини. Водночас розрахункове значення дисторсії на самому краю поля зору становить близько 2%.

Підсумовуючи це, можна зробити загальний висновок: виявлені залишкові аберації розрахованої зум-афокальної системи знаходяться в допустимих межах. Це дає обгрунтовані підстави стверджувати, що при подальшій інтеграції в оптичний тракт зум-монокуляра дана афокальна підсистема не вноситиме суттєвого додаткового аберраційного вкладу та не спричинить суттєвого

погіршення загальної якості сформованого зображення.

Розроблена оптична схема зум-афокальної системи є працездатною та відповідає висунутим до неї технічним вимогам. Рівень залишкових аберацій дає підстави використовувати її для подальшої інтеграції в систему зум-монокуляра.

3.3 Компоновка оптичної системи зум-монокуляра з аналізом її параксіальних параметрів і аберацийного стану

На рисунку 3.12 наведено загальну оптичну систему зум-монокуляра, яка є результатом по’єднання попередньо розрахованої зум-афокальної підсистеми та розрахованого монокуляра. Таке комплексне представлення дозволяє оцінити загальні габарити приладу та простежити повний шлях проходження світла.

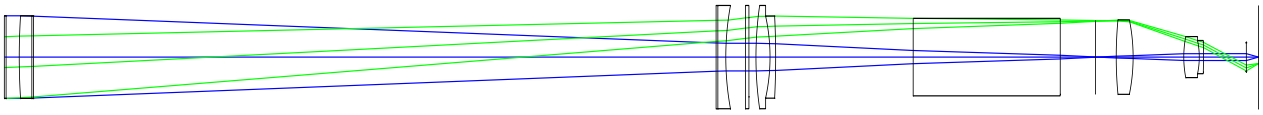


Рис. 3. 12 Оптична система зум-монокуляра

Оскільки у зібраному вигляді оптична система характеризується значною протяжністю вздовж оптичної осі, її відображення цілком призводить до надто дрібного масштабу. Тому, для забезпечення належної деталізації ключових вузлів, на рисунку 3.13 окремо та крупнішим планом зображено окулярну частину приладу. Її візуалізація подана в спеціальному режимі мультиконфігурації, що дозволяє демонструвати зміну положення оптичних компонентів та хід променів одразу для п’яти заданих дискретних значень кутового збільшення зум-монокуляра.

Як видно з рис. 3.13, оптична схема зум-монокуляра формує зображення заданих предметних точок у нескінченності. Для проведення аналізу її функціонування було обрано дві предметні точки: перша розташована безпосередньо на головній оптичній осі, друга – на краю поля зору з кутовою координатою $1{,}5°$.

З метою оцінки якості сформованих системою зображень, за монокуляром у комп’ютерну модель було введено допоміжний безабераційний параксіальний компонент із фокусною відстанню 3,437 мм. Таке рішення дозволяє сфокусувати паралельні пучки променів та візуалізувати залишкові кутові аберації в кутових хвилинах.

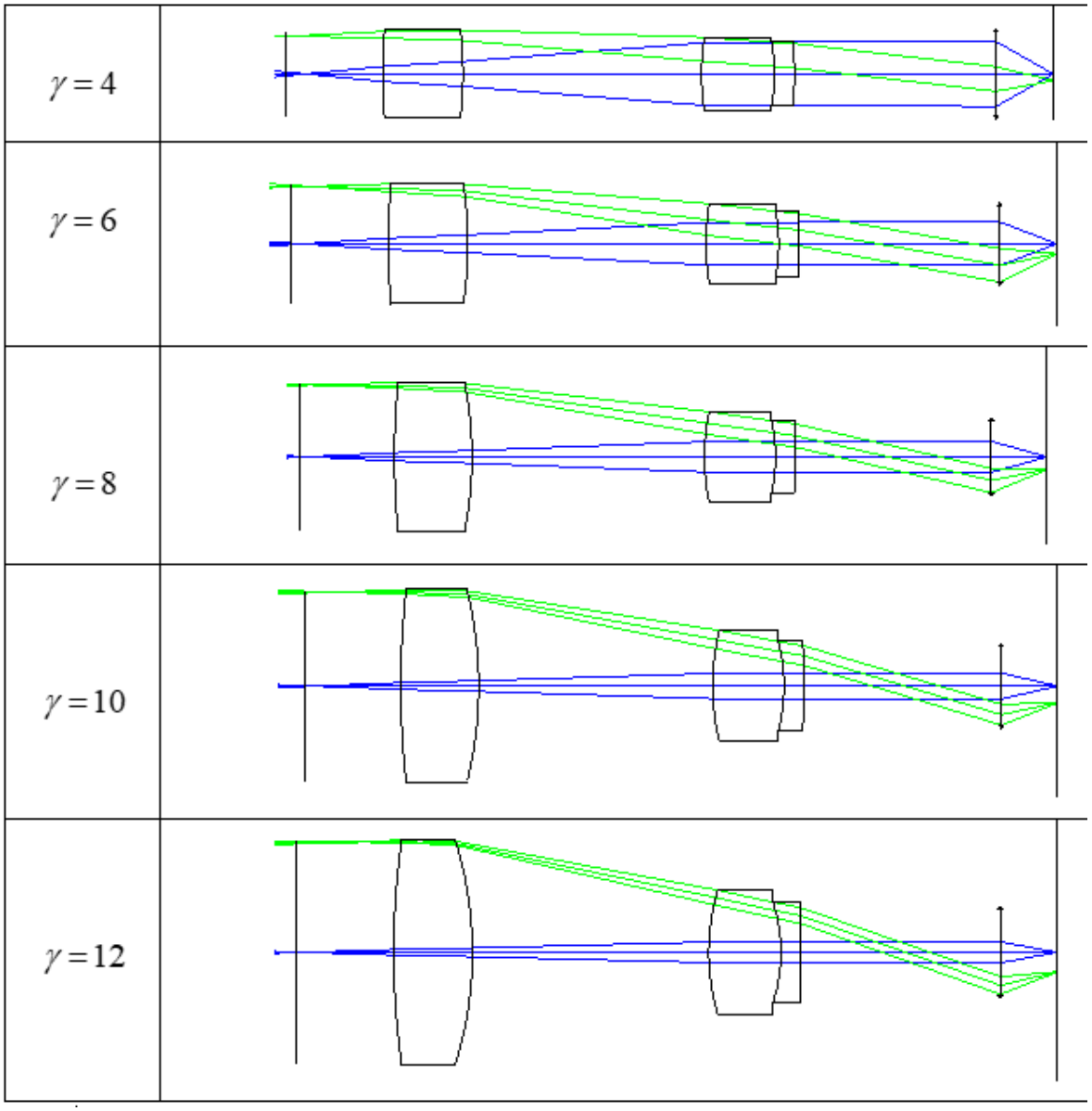


Рис. 3. 13 Хід променів за окуляром зум-монокуляра при п’яти заданих

Розподіл променів аналізується у фокальній площині цього параксіального компонента за допомогою спот-діаграм. Завдяки спеціально підібраній фокусній відстані лінзи, результати подаються у зручному для сприйняття кутовому

масштабі: лінійний розмір в 1 мікрометр на отриманій спот-діаграми точно відповідає одній кутовій хвилині. Відповідно розрахункові спот-діаграми, зняті для п’яти дискретних значень кутового збільшення системи, представлені на рисунку 3.14.

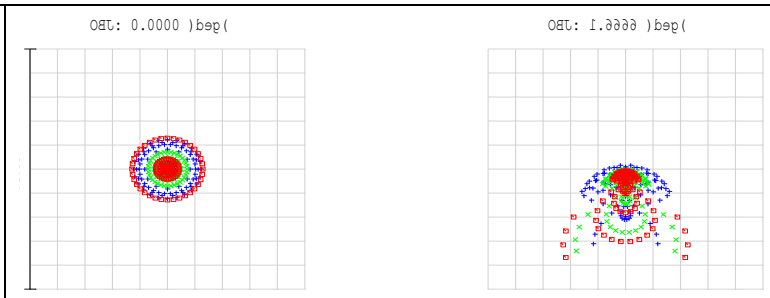
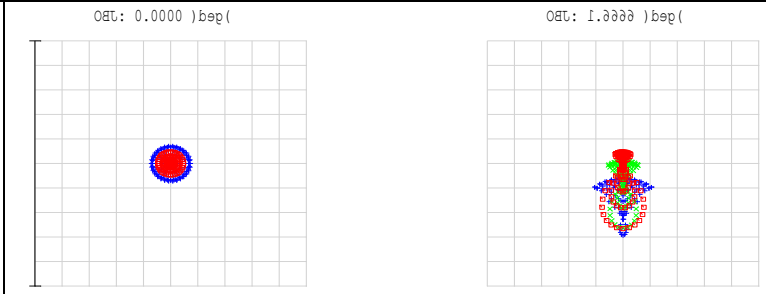
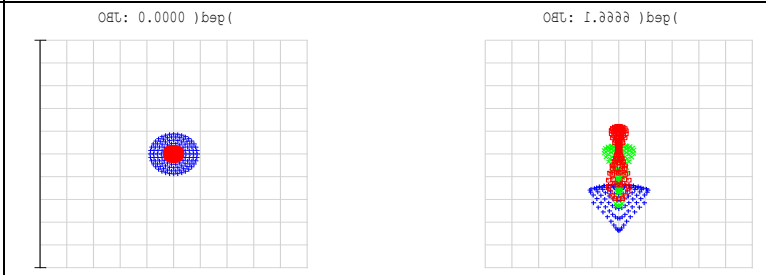
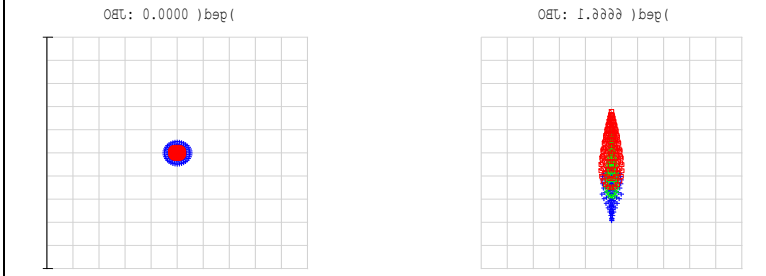
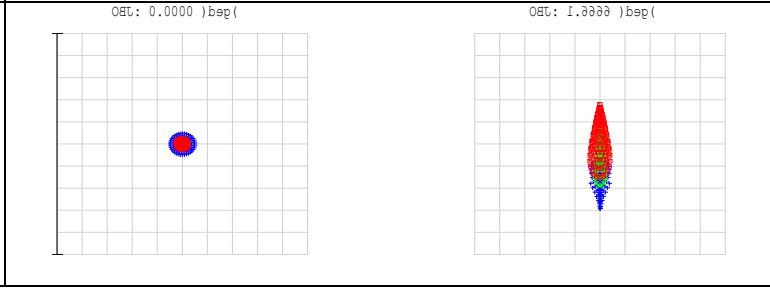
$\gamma = 4$		RMS radius : 2.884 5.803 GEO radius : 5.144 17.099
$\gamma = 6$		RMS radius : 1.623 4.812 GEO radius : 2.883 11.694
$\gamma = 8$		RMS radius : 1.666 5.682 GEO radius : 3.516 13.453
$\gamma = 10$		RMS radius : 1.818 8.443 GEO radius : 3.753 19.754
$\gamma = 12$		RMS radius : 2.305 12.501 GEO radius : 4.871 29.284

Рис. 3. 14 Спот-діаграми зображення двох точок простору предметів – зліва – осьова, справа – на краю поля зору

Комплексний аналіз отриманих спот-діаграм дає підстави стверджувати, що розрахована оптична схема забезпечує задовільну якість формованого зображення, яка відповідає нормованим значенням для візуальних оптичних приладів.

Разом з тим, наявність певного рівня залишкових спотворень свідчить про те, що поточна конфігурація системи не є остаточною і має резерв для покращення характеристик. Для досягнення вищих оптичних показників. Зокрема, передбачається процедури додаткової оптимізації конструктивних параметрів, з метою максимальної можливої мінімізації залишкових аберацій.

3.4. Функціональна і оптична схема зум-монокуляра

Функціональна схема зум-монокуляра показана в Додатку А.

Робота зум-монокуляра базується на синхронній зміні оптичних сил двох варіолінз при надходженні керуючої команди оператора (користувача). Процес виглядає наступним чином:

1) Оператор натискає перемикач у положення $\gamma+$ для зростання кутового збільшення зображення, або для його зменшення $\gamma-$.

2) Обробка сигналів: мікроконтролер зчитує стан перемикача і формує відповідні керуючі сигнали. Оскільки зміна збільшення вимагає одночасної зміни фокусної відстані варіолінз, мікроконтролер відправляє команди одразу на драйвери кожної варіолінзи.

3) Варіолінза ML-20-37 має механічне керування через обертання зовнішнього зубчастого кільця. Для обертання цього кільця до нього в якості кінематичної пари приєднується друге зубчасте колесо, яке знаходиться на валу крокового обертального мікродвигуна. Сигнал від мікроконтролера надходить на драйвер крокового мікродвигуна, який обертанням валу змінює кутове положення зовнішнього кільця варіолінзи ML-20-37 , надаючи їй потрібну оптичну силу.

4) Для електричного керування варіолінзи EL-16-40 мікроконтролер одночасно надсилає сигнал на драйвер цієї лінзи. Варіолінза змінює свою оптичну силу під дією керуючого електричного струму, який потрапляє на актуатор варіолінзи і без механічних рухів змінює її оптичну силу.

В такому вигляді зум-монокуляр є автоматизованою електронно-оптичною системою. Його головна перевага полягає в тому, що всі оптичні елементи в ньому є нерухомими. Від користувача вимагається лише проста дія – натискати перемикач ЗУМУ. При цьому мікроелектроніка практично миттєво виконує зміну кутового збільшення зум-монокуляра.

У додатку Б наведена оптична схема системи зум-монокуляра, розробленої в даній роботі.

3.5 Драйвери варіолінз

Компанія Optotune пропонує офіційне апаратне рішення – Electrical Lens Driver 4/4i, яке здійснює точне формування електричного сигналу для актуатора лінзи, зчитування даних зворотного зв’язку та програму компенсацію температурного дрейфу. Контролер виконано у вигляді компактного апаратного модуля (донгла), призначеного для прямої інтеграції в оптико-електронні коммплекси та системи комп’ютерного зору.

Рис. 3. 15 Зовнішній вигляд драйвера Electrical Lens Driver 4/4i [17]

З протилежного боку обох модифікацій плати розташовано стандартний штекер USB Type-A, який одночасно слугує для передачі керівних команд ПК та

забезпечення живлення всього модуля. При розробці конструкторської документації враховують дві модифікації пристрою:

1) Lens Driver 4 [16]: Постачається у полегшеному пластиковому корпусі із габаритнимм розмірами 77x19x13мм та вагою 11 г. Для підключення варіолінзи використовується 6-піновий FPC-роз'єм із кроком контактів 0.5 мм.

2) Lens Driver 4i [17]: Розроблений для більш жорстких умов експлуатації, має сталевий корпус із габаритом 99.05x19x13.5 мм. та вагу 41 г. для кращого екранування та тепловідведення. Підключення лінзи реалізовано через надійний промисловий 6-піновий роз'єм серії Hirose.

Для повного розуміння алгоритмів автоматичного масштабування у проєктованому зум-монокулярі необхадно розглянути базову робочу характеристику системи "драйвер-лінза". Цей графік відображає фундаментальну залежність оптичної сили від струму, а також принцип роботи математичної моделі компенсації, що закладена в прошивку мікроконтролера ATmega32U4.

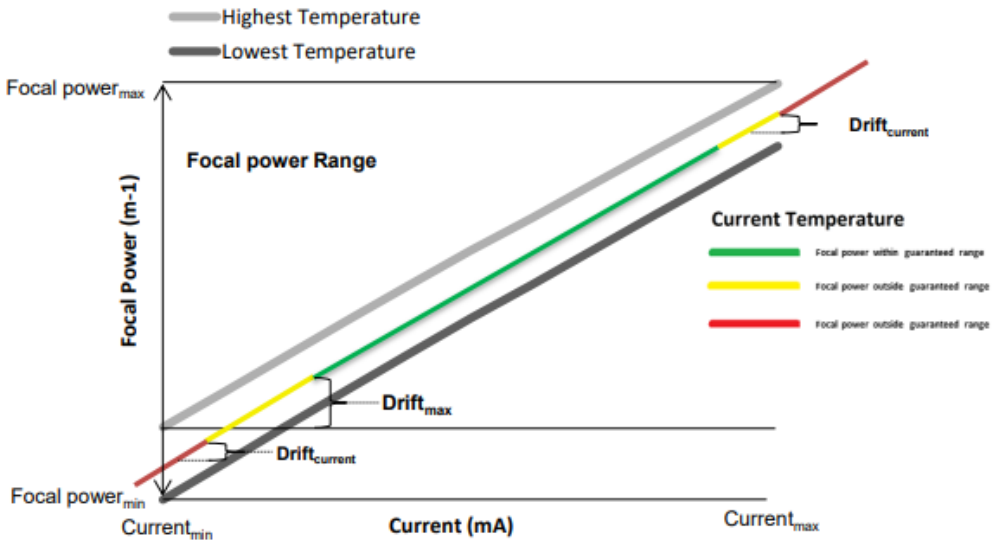


Рис. 3. 16 Графік залежності опичної сили варіолінзи від сили керованого струму драйвера та схема зміщенні точок при температурному зсуві [16].

Аналіз цього графіку дозволяє виділити такі закономірності:

1) Лінійність керування: за нормальних умов експлуатації залежність оптичної сили від сили струму є строго лінійною. Це головна перевага рідкий лінз Optotune, оскільки лінійність спрощує програмне керування: драйверу не потрібно прораховувати складні поліноми, достатньо лінійно змінювати струм для отримання заданого фокусу.

2) Температурний зсув нуля: Зміна температури викликає ефект температурного зсуву нуля, при якому весь лінійний графік зміщується паралельно вгору або вниз на велечину $Drift_{max}$. Лінії найвищого та найнижчої температур демонструють, як змінюється ця характеристика при нагріванні або охолодженні рідини лінзи.

3) Апаратні ліміти: Проте через обмеження максимального вихідного струму драйвера при екстремальних температурах реальний робочий діапазон оптичної сили лінзи звужується. Це зумовлено тим, що контролер фізично досягає своїх апаратних лімітів струму для компенсації дрейфу.

Робота з цим драйвером ведеться переважно в режимі “закритого циклу”, де система формує потрібне значення в діоптріях, а драйвер самостійно розраховує необхідний компенсаційний струм.

На відміну від цифрової комунікації по шині USB у Lens Driver 4, взаємодія з варіолінзою ML-20-37 вимагає кардинально іншого методу апаратного контролю.

Отримавши сигнал від свого драйвера, кроковий двигун починає обертатися, через зубчасту передачу обертається зовнішнє кільце варіолінзи ML-20-37, що призводить до зміни тиску і зміни кривизни поверхні мембрани цієї лінзи встановлюючи при цьому потрібне значення її оптичної сили.

Програма мікроконтролера має передбачати процедуру стартового калібрування. При запуску системи драйвер обертає двигун до спрацьовування кінцевого вимикача. У загальному циклі масштабування мікроконтролер видає імпульси STEP на драйвер ML-20-37.

Використання двох драйверів дозволяє головному мікроконтролеру незалежно і паралельно керувати компонентами: апаратно змінювати кривизну мембрани ML-20-37 через імпульси крокового драйвера та одночасно надсилати цифрові команди струмової корекції на USB-драйвер EL-16-40-TC.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проєкту на тему “Автоматизований зум-монокуляр” згідно Завданню було обгрунтовано та розроблено оптичну систему , що забезпечує плавне автоматизоване регулювання кутового збільшення монокуляра в діапазоні від 4х до 12х.

При цьому проведено комплексний аналіз сучасних методів побудови оптичних систем зі змінним збільшенням на базі адаптивної оптики. Було виконано габаритний розрахунок оптичних компонентів монокуляра. Для забезпечення зміни масштабу зображення без використання механічних рухів було обрано адаптивні варіолінзи швейцарської компанії Optotune (моделі EL-16-40 та ML-20-37).

На базі вказаних варіолінз було скомпоновано зум-афокальну систему галілеївського типу. Також розроблено функціональну схему пристрою, яка передбачає використання мікроконтролера та спеціалізованих драйверів для швидкого автоматизованого керування варіолінзами.

Виконане моделювання ходу променів в оптичному редакторі ZEMAX у режимі мультиконфігурації дозволило протестувати роботу ступенів збільшення. Побудовані спот-діаграми та графіки підтвердили, що залишкові аберації знаходяться в межах допустимих норм для візуальних систем.

Завдяки використанню адаптивної оптики вдалося повністю відмовитися від складних механічних приводів і напрямних. Впровадження такої автоматизованої системи забезпечує потрібну швидкість фокусування та високу експлуатаційну надійність із ресурсом понад 1 млрд циклів спрацювання варіолінз.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

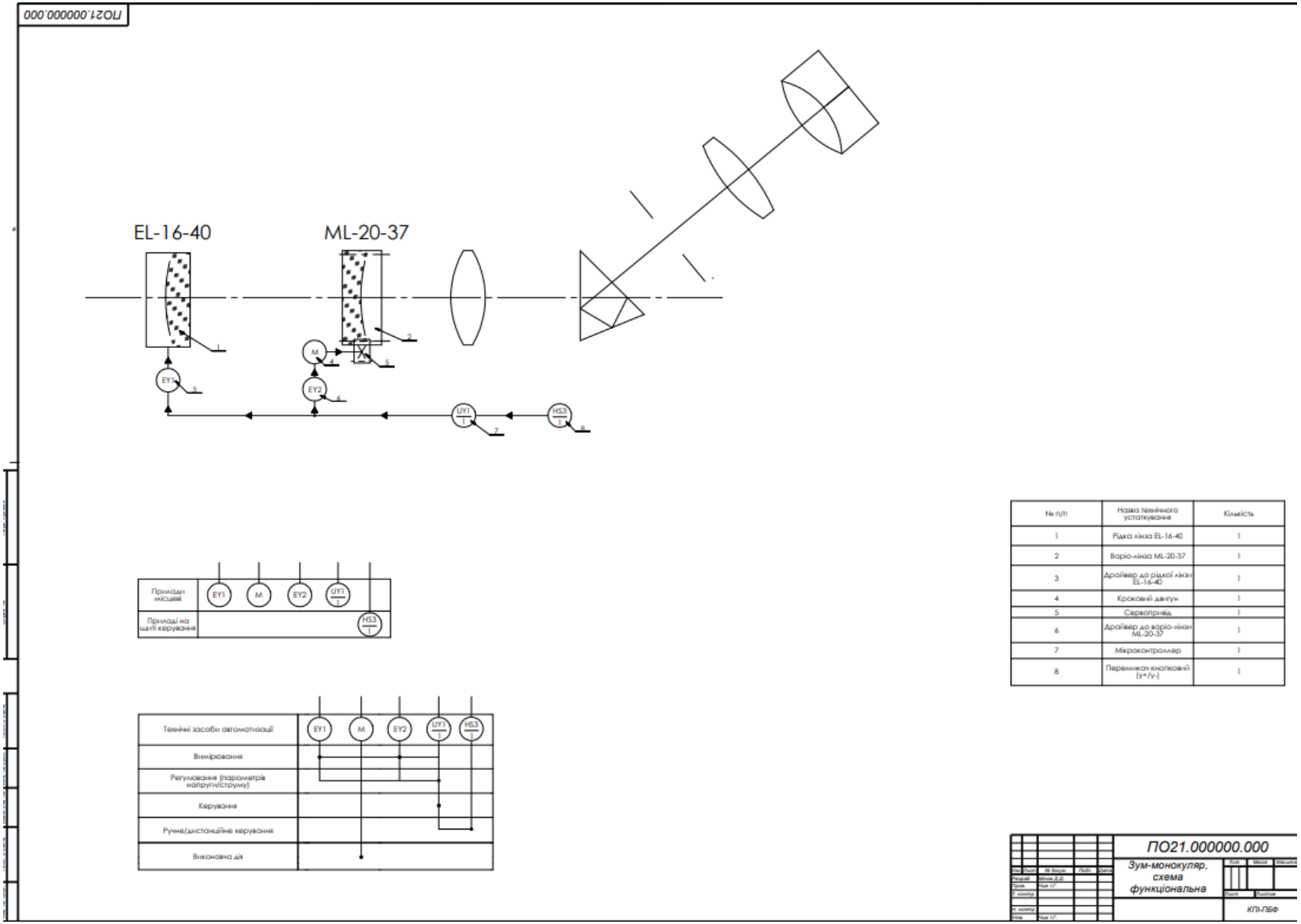
1. Теорія оптичних систем: Методичні вказівки до виконання курсового проекту [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології» та спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» спеціалізації «Оптико-електронні інформаційно вимірювальні системи та технології» / І.Г. Чиж ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 16,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 62 с.
2. Чиж І. Г. Теорія оптичних систем : підручник / І. Г. Чиж. – Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 426 с.
3. Qu R., Zhang H., Yang L., Chen W. Analysis and Design of Infrared Search and Track System with Afocal Zoom Telescope // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 24. – Article 13132.
4. Afocal Zoom Lenses and their Applications Artur Hoegele Carl Zeiss Meditec AG, Germany
5. Чиж, І. Г. Трикомпонентні лінзові зум-афокальні системи трансфокаторів / І. Г. Чиж, К. С. Лісняк // Наукові вісті КПІ : міжнародний науково-технічний журнал. – 2019. – № 3(125). – С. 73–79. – Бібліогр.: 13 назв.
6. Чиж, І. Г. Чотирикомпонентні лінзові зум-афокальні системи / І. Г. Чиж, К. С. Лісняк // Наукові вісті КПІ : міжнародний науково-технічний журнал. – 2019. – № 5-6(127). – С. 80–86. – Бібліогр.: 14 назв.
7. https://www.researchgate.net/figure/The-zoom-lens-concept-a-Ray-tracing-diagrams-for-all-five-configurations-By_fig1_386020388

8. Chyzh I.G., & all. Zoom vario-optical systems of optoelectronic sensors with immobile components, https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/819
9. Чиж І. Варіолінзи як нерухому елементи zoom-оптичних систем/ KPI Science News 2026 №1, стор. 50-59, https://doi.org/10.20535/kpisn.2026.1.353417
10. Tunable lenses – Optotune. Available: https://www.optotune.com/tunable-lenses
11. Corning® Varioptic® Lenses Market-leading adjustable lens solutions for industrial applications. Available:https://www.corning.com/media/worldwide/Innovation/documents/FINAL%20for%20Print_CorningVariopticLenses_productbrochure_Oct.18.18.pdf
12. Datasheet: EL-16-40-TC-20D; Available: https://www.optotune.com/wp-content/uploads/2026/03/OptotuneEL-16-40-TC-VIS-20D.pdf
13. Datasheet: ML-20-37; Available: https://www.optotune.com/wp-content/uploads/2026/01/OptotuneML-20-37.pdf
14. Zoom vario-optical systems of optoelectronic sensors with immobile components Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології № 2 (50), 2025, pp 251-268 **:** DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-251-268
15. Варіолінзи як нерухомі елементи zoom-оптичних систем KPI Science News 2026 №1, стор. 50-59 DOI: https://doi.org/10.20535/kpisn.2026 DOI: https://doi.org/10.20535/kpisn.2026
16. Datasheet: Electrical Lens Driver 4; Available: https://ftp.stemmer-imaging.com/webdavs/docmanager/102968-Optotune-LensDriver4-Manual.pdf

17. Optotune Lens Driver 4 Manuals; Available: https://www.manualslib.com/products/Optotune-Lens-Driver-4-13061709.html

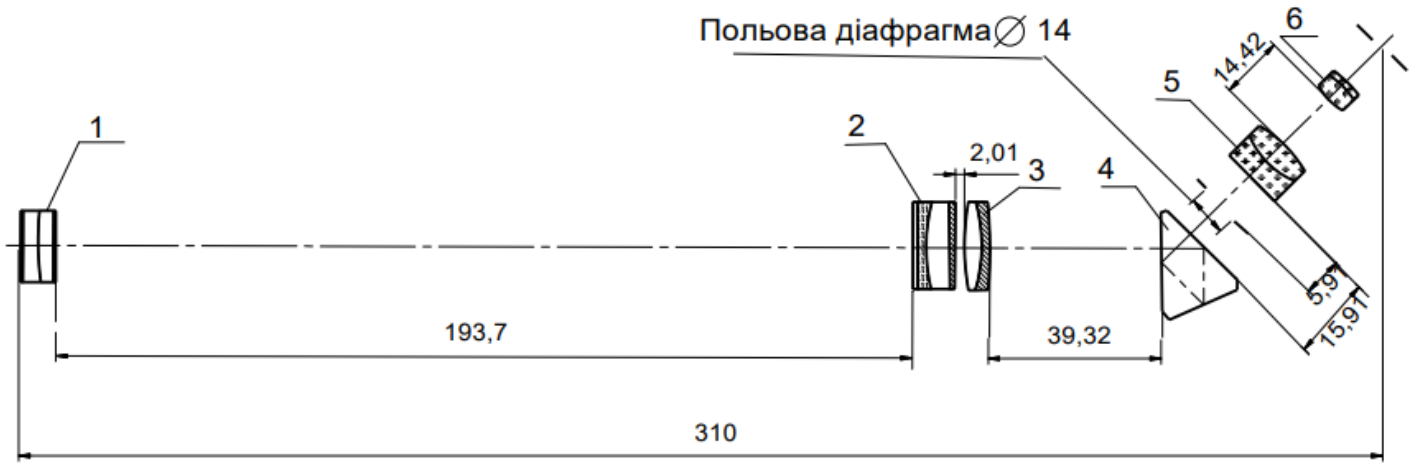
ДОДАТОК А

Зум-монокуляр, схема функціональна



ДОДАТОК Б

Зум-монокуляр, схема оптична принципова



1.Кутове збільшення: від 4 до 12
2.Поле зору: від 10 до 3.3
3.Діаметр вихідної зіниці від 3 мм до 1 мм

					ПО21.000000.000	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Зум-монокуляр, схема оптична принципова	Лит. / Масса / Масштаб
Разраб.		Мінов Д.Д.				
Пров.		Чиж І.Г.				Лист / Листов
Т. контр.						
Н. контр.						КПІ, ПБФ
Утв.		Чиж І.Г.				

Перв. примен. | Справ. № | Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл.

Файл: опт. схема прин.

Копировал | Формат А3