

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

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри КІОНС

_____ Надія БУРАУ

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Комп'ютерно-інтегрована зум-афокальна оптична система розширювача лазерного пучка на варіо-лінзах»

Виконав:

студент IV курсу, групи П0-01,
Губійчук Роман Олександрович

Керівник:

д. т. н., професор,
Чиж Ігор Генріхович

Рецензент:

к. т. н., доцент,
Філіппова Марина В'ячеславівна

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

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 системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІОНС

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 2024_ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студента

Губійчука Романа Олександровича

1. Тема проекту «Комп'ютерно-інтегрована зум-афокальна оптична система розширювача лазерного пучка на варіо-лінзах», затверджена наказом по університету від «__» _____ 2024_ р. № _____
2. Термін подання студентом дипломної роботи: 15.06.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту: 1. Лазерний діод Nichia NDS4116, довжина хвилі 488 нм, 50 мВт, діаметр пучка 4 мм, кутова розбіжність лазерного пучка 0.2 мрад.
 2. Зменшення розбіжності пучка в діапазоні від 0.2 мрад до 0.05 мрад.
 3. Максимально допустимий осьовий габарит оптичної системи (в тонких компонентах) 200 мм.
4. Зміст пояснювальної записки:
 - Вступ.
 - Розділ 1 Огляд інформаційних джерел з теорії афокальних (телескопічних) систем, теорії зум-афокальних систем на варіо-лінзах, огляд комерційних моделей варіолінз.
 - Розділ 2 Габаритний розрахунок оптичної зум-афокальної з обґрунтуванням вибору моделі варіолінз і описом пристроїв керування (драйверів) оптичними силами варіолінз.
 - Розділ 3. Абераційний аналіз зум-афокальної системи.

5. Перелік графічного матеріалу, включеного до презентації:

Оптична схема зум-афокальної системи. Функціональна схема з драйверіями до варіо-лінз. Графіки в ZEMAX сферичної аберації зум-афокальної системи для значень кутового збільшення 0.5, 0.25 .

Дата видачі завдання: 16.04.2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Розділ 1.	24.05.2024	
2	Розділ 2.	31.05.2024	
3	Розділ 3..	07.06.2024	
4	Схема оптична	31.05.2024	
5	Схема функціональна	03.06.2024	
6	Графіки аберацій	07.06.2024	
6	Презентація	12.06.2024	
7	Попередній захист	14.06.2024	

Студент

Роман Губійчук

Керівник

Ігор Чиж

Анотація

Данна бакалаврська дипломна робота складається зі вступу, трьох основних розділів, загального висновку, списку використаних літературних джерел та графічного матеріалу.

Актуальність теми:

У сучасному світі всі галузі виробництва, в тому числі і оптична, розвиваються швидкими темпами. З'являються нові технології, які покликані відкривати нові можливості у приладобудуванні та поліпшувати вже налаштовані процеси виробництва. Одним з таких оптичних винаходів є варіо-лінза. Тема варіо-лінз, ще мало досліджена та не набула широкого застосування у наш час, але з кожним роком розвиток цієї теми прогресує і все ширше впроваджується у новітніх розробках.

Актуальність теми "Зум-афокальна система на варіо-лінзах" полягає в розробці і застосуванні нових оптичних систем змінної фокусної відстані для різних застосувань. Зростаючий інтерес до цієї теми визначається потребою в розробці компактних, ефективних та зручних оптичних пристроїв для різноманітних галузей, таких як фото- та відеозйомка, медична та військова галузі застосування, віртуальна реальність та інші.

Зум-афокальні системи на варіо-лінзах пропонують переваги у порівнянні з традиційними оптичними системами, такі як компактні розміри, легкість управління фокусною відстанню та більша гнучкість в застосуванні. Також однією з головних переваг зум-афокальних систем на варіо-лінзах є можливість створення простої, з механічної точки зору, оптичної системи з нерухомими компонентами. У такій системі можна легко контролювати оптичну силу варіо-лінз, за рахунок чого немає потреби інтегрувати у систему складні механізми, які б відповідали за рух компонентів системи, тим самим контролюючи її параметри. Дослідження в цій області може привести до створення нових продуктів з високою якістю зображення та покращеними можливостями користувача, що

відкриває широкі перспективи для різних сфер технологій та додаткових можливостей для розвитку оптичних систем.

Мета роботи:

Дана робота покликана показати наочний приклад зум-афокальної системи з нерухомими компонентами, побудованої з використанням варіо-лінз. На прикладі розширювача лазерного променя дослідити діапазон функціональних параметрів такої системи, оцінити якість зображень, сформованих зум-афокальною системою на варіо-лінзах.

Ключові слова:

Варіо-лінза, зум-афокальна оптична система, нерухомі компоненти, змінний фокус, розширювач лазерного променя, комп'ютерна інтеграція, оптичних систем.

Annotation

This bachelor's thesis consists of an introduction, three main chapters, a general conclusion, a list of references and graphic material.

Actuality of theme:

In the modern world, all industries, including the optical industry, are developing at a rapid pace. New technologies are emerging that are designed to open up new opportunities in instrumentation and improve already established production processes. One of these optical inventions is the vari-lens. The topic of varifocal lenses is not yet widely studied and has not been widely used in our time, but every year the development of this topic is progressing and is being more and more widely implemented in the latest developments.

The relevance of the topic “Zoom-afocal system on vari-lenses” lies in the development and application of new optical systems of variable focal length for various applications. The growing interest in this topic is determined by the need to develop compact, efficient and convenient optical devices for various industries, such as photography and video, medical and military applications, virtual reality and others.

Zoom-afocal systems on varifocal lenses offer advantages over traditional optical systems, such as compact size, ease of focal length control, and greater flexibility in application. Also, one of the main advantages of varifocal zoom-afocal systems is the ability to create a simple optical system with fixed components from a mechanical point of view. In such a system, the optical power of the vari-lenses can be easily controlled, so there is no need to integrate complex mechanisms into the system that would be responsible for the movement of the system components, thereby controlling its parameters. Research in this area can lead to new products with high image quality and improved user experience, which opens up broad prospects for various technology areas and additional opportunities for optical system development.

Project goal:

This paper aims to show an illustrative example of a zoom-apical system built using varifocal lenses. Using the example of a laser beam expander, we investigate the parameters of such a system and evaluate the quality of a zoom-apical system based on varifocal lenses.

Keywords:

Vari-lens, zoom-apical optical system, fixed components, variable focus, laser beam expander, computer integration, optical system design.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ З ТЕОРІЇ АФОКАЛЬНИХ (ТЕЛЕСКОПІЧНИХ) СИСТЕМ, ТЕОРІЇ ЗУМ-АФОКАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ВАРІО-ЛІНЗАХ, ОГЛЯД КОМЕРЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ВАРІОЛІНЗ.....	11
1.1 Огляд інформації за темою “Афокальні оптичні системи”	11
1.1.1 Загальні поняття про афокальну оптичну систему.....	11
1.1.2 Хід променів в афокальних системах Кеплера та Галілея.....	13
1.1.3 Основні параметри телескопічних систем	16
1.1.4 Розрахунок основних параметрів афокальної системи.....	17
1.2 Огляд інформації за темою “Варіолінзи”	26
1.2.1 Загальні положення про варіолінзи.....	26
1.2.2 Еластомерна мембранна лінза	26
1.2.3 Електрозмочувальна лінза.....	34
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	43
РОЗДІЛ 2. ГАБАРИТНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ ЗУМ-АФОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З ОБГРУНТУВАННЯМ ВИБОРУ МОДЕЛІ ВАРІОЛІНЗ І ОПИСОМ ПРИСТРОЇВ КЕРУВАННЯ (ДРАЙВЕРІВ) ОПТИЧНИМИ СИЛАМИ ВАРІОЛІНЗ.	44
2.1 Завдання розділу та вихідні дані	44
2.2 Вибір типу зум-афокальної системи для габаритного розрахунку оптичної системи	45
2.3 Вибір варіо-лінз, розрахунок їх параметрів та побудова оптичної схеми ...	47
2.4 Розрахунок поля зору оптичної системи	52
2.5 Вибір та розрахунок механічних компонентів системи.....	53
2.6 Вибір елементів керування (драйвер і мікроконтролер) та написання коду програми для керування оптичною силою варіолінз	59
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	63
РОЗДІЛ 3. АБЕРАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ЗУМ-АФОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	64
3.1 Завдання розділу.....	64
3.2 Дослідження сферичних аберацій зум-афокальної системи на варіо-лінзах при значенні кутового збільшення $\gamma = 1$	64
3.3 Дослідження сферичних аберацій зум-афокальної системи на варіо-лінзах при значенні кутового збільшення $\gamma = 2$	66

3.4 Дослідження сферичних аберацій зум-афокальної системи на варіо-лінзах при значенні кутового збільшення $\gamma = 4$	67
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....	69
Використані джерела	71

ВСТУП

Зум-афокальна система на варіо-лінзах є сучасною оптичною технологією, що знаходить широке застосування у багатьох галузях науки та техніки. В основі цієї системи лежить принцип використання змінної фокусної відстані (варіо-лінз), що дозволяє змінювати масштаб зображення без зміни положення оптичних компонентів. Завдяки цьому забезпечується гнучкість і універсальність оптичних систем, що використовуються в таких сферах, як фотографія, відеозйомка, мікроскопія, телекомунікації та військова техніка.

Сучасні зум-афокальні системи характеризуються високою точністю і стабільністю роботи, що досягається завдяки вдосконаленим матеріалам і технологіям виготовлення лінз. Використання варіо-лінз дозволяє отримати зображення високої якості з можливістю плавної зміни масштабу, що є надзвичайно важливим для задач, де необхідна оперативна адаптація до змінних умов спостереження або зйомки. Окремо потрібно зазначити, що варіо-лінзи дозволяють створити оптичну систему з нерухомими компонентами, параметрами якої можна легко керувати за допомогою комп'ютера, безпосередньо змінюючи параметри варіо-лінзи, при цьому не змінюючи положення компонентів як у звичних оптичних системах. Завдяки цій особливості варіо-лінзи є інноваційним продуктом, які дозволяють змінити підхід до розробки нових оптичних систем або ж модернізувати та покращити функціональність вже готових.

У цьому дослідженні розглядаються основні принципи побудови зум-афокальних систем на варіо-лінзах, їхні оптичні характеристики, а також можливі варіанти застосування. Окрему увагу приділено аналізу конструктивних особливостей таких систем та їх впливу на якість зображення. Метою даної роботи є вивчення потенціалу зум-афокальних систем на варіо-лінзах та визначення перспектив їхнього розвитку в контексті сучасних технологічних досягнень.

Для досягнення поставленої мети передбачено використання сучасних комп'ютерних технологій та програмування. Застосування комп'ютерних буде використовуватись для регулювання параметрів варіо-лінз та керування оптичною системою загалом.

Метою даної дипломної роботи є розробка оптичної зум-афокальної системи на варіо-лінзах у вигляді розширювача лазерного променя. Основним завданням дослідження є вивчення теоретичних основ про варіо-лінзи та зум-афокальні системи, приклади варіо-лінз, які зараз доступні на ринку та на основі даних досліджень розробка оптичної системи розширювача лазерного променя.

Робота над зум-афокальною системою на варіо-лінзах є актуальною через її широке застосування в сучасних лазерних технологіях, де важливо забезпечити високу якість і точність регулювання параметрів променя. Використання варіо-лінз дозволяє створювати гнучкі та універсальні оптичні системи, що адаптуються до змінних умов роботи, підвищуючи ефективність у наукових, медичних і промислових застосуваннях. Крім того, інноваційні рішення в цій сфері сприяють розвитку нових технологій і матеріалів, що має значний економічний та науковий потенціал.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ З ТЕОРІЇ АФОКАЛЬНИХ (ТЕЛЕСКОПІЧНИХ) СИСТЕМ, ТЕОРІЇ ЗУМ-АФОКАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ВАРІО-ЛІНЗАХ, ОГЛЯД КОМЕРЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ВАРІОЛІНЗ

1.1 Огляд інформації за темою “Афокальні оптичні системи”

1.1.1 Загальні поняття про афокальну оптичну систему

Афокальна або телескопічна оптична система – це система, яка має нульову оптичну силу. Промені світла проходячи через таку систему фокусуються на безкінечності. Прикладами афокальних систем є насадки для об’єктивів фотоапаратів та тепловізорів, телескопи, далекоміри та інші оптичні пристрої. Особливістю будови афокальних систем є те, що задній фокус першого елемента системи збігається з переднім фокусом другого елемента. Паралельний промінь на вході системи перетворюється в паралельний промінь на виході системи, але з іншим нахилом відносно оптичної осі. [3] Дане твердження можна описати математично виразом 1.1.

$$f_1' + f_2' = d_1 \quad (1.1)$$

З виразу (1.1) можна виявити, як повинні розташовуватись компоненти в оптичній системі, для того щоб вона стала афокальною. [4]

Телескопічна оптична система, може бути як дзеркальною, так і лінзовою. На практиці афокальні системи поділяють на 2 типи, а саме:

- Система Галілея (рис.1.1)
- Система Кеплера (рис.1.2)

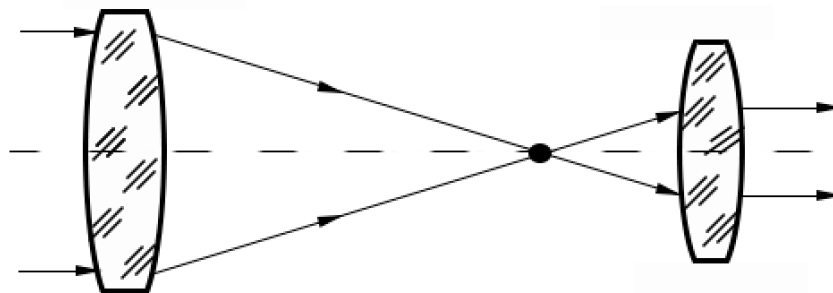


Рис 1.1 – Телескопічна система Галілея

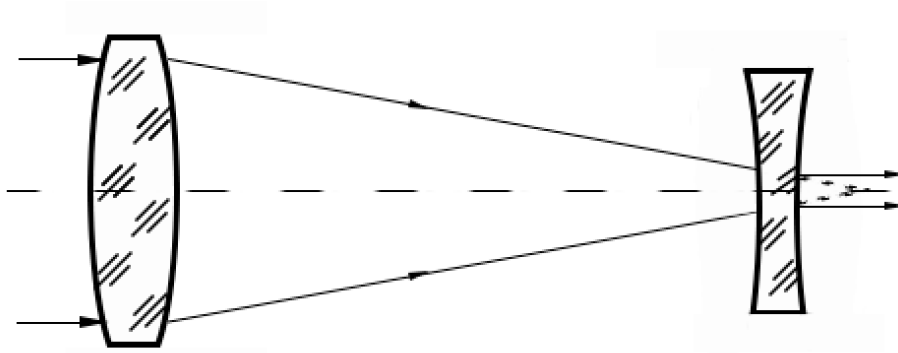


Рис 1.2 – Телескопічна система Кеплера

Кожен тип телескопічних систем має свої переваги та недоліки і обирається в залежності від вимог завдання. У наступному пункті ми більш детально розглянемо кожну з систем і розберемо їх особливості.

Загальні відомості про системи Кеплера та Галілея

Розглянемо 2 типи афокальних систем. У першому випадку перший і другий елементи оптичної системи є збиральними лінзами (мають додатну оптичну силу). Особливість таких систем це додатні значення фокусних відстаней обох компонентів. На Рис. 1.3 показана розміщення компонентів у такій системі. Бачимо, що у цьому випадку дійсний задній фокус першого компоненту збігається з дійсним переднім фокусом другого компонента. Така афокальна система називається **системою Кеплера**

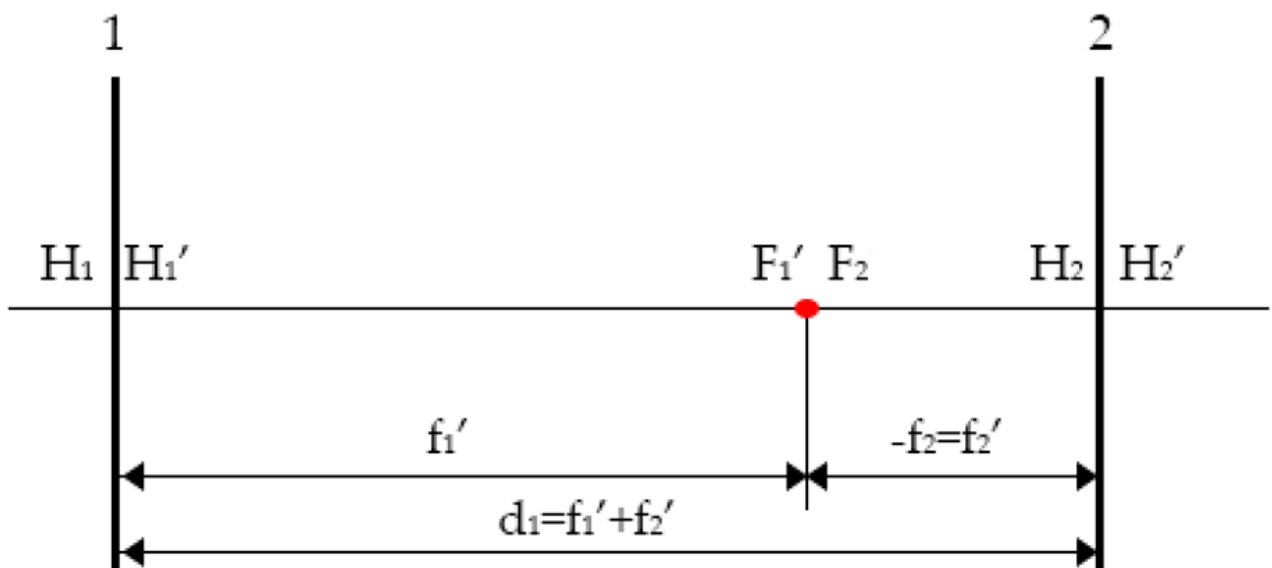


Рис. 1.3 – Розміщення компонентів у системі Кеплера

У другому випадку перший елемент оптичної системи це збиральна лінза з додатною оптичною силою, а другий елемент, розсіювальна системи з від'ємною оптичною силою. Іншими словами ми маємо компоненти з різними фокусними відстанями. На Рис. 1.4 бачимо, що умова (1.1), як і в попередньому випадку, призводить до суміщення дійсного заднього фокусу першого компоненту і уявного переднього фокусу другого компоненту. Така афокальна система називається **системою Галілея**.

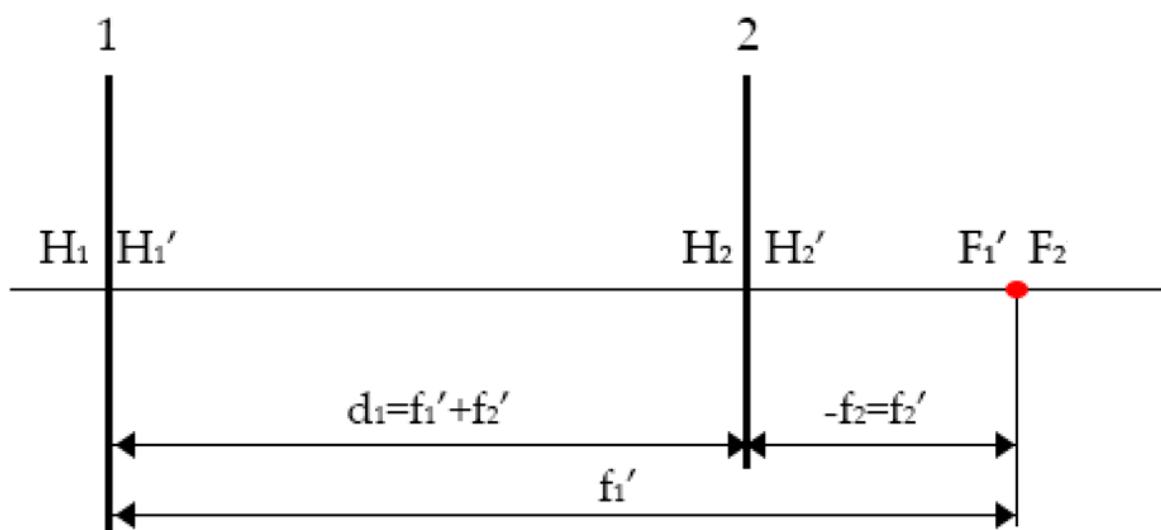


Рис. 1.4 – Розміщення компонентів у системі Галілея

Коли ми більш детально розглянули будову та особливості обох типів афокальних систем, можемо зробити висновки, що кожна з них має свої переваги та недоліки, тому при виборі оптичної системи потрібно звертати увагу на доцільність використання певного типу в залежності від вимог завдання, а також яким умовам має відповідати система в першу чергу щоб досягти поставленої мети.

1.1.2 Хід променів в афокальних системах Кеплера та Галілея

Пучки променів входять в афокальну оптичну систему з безкінечності і складаються з паралельних променів. Щоб розглянути хід променів таких пучків буде доцільним розглянути 2 випадки. У першому випадку маємо промінь, який прямує паралельно оптичній осі (такий пучок називається *осьовим*). У другому

випадку промінь спрямований під деяким кутом до оптичної осі (*позаосьовий* пучок світла).

Спочатку розглянемо хід осевого пучка в оптичних системах Кеплера та Галілея зображених на Рис. 1.5 та Рис. 1.6 відповідно. Після проходження першого компонента системи промені сходяться у точці його заднього фокусу F_1' . Точка F_1' одночасно є переднім фокусом F_2 другого компонента. Тому після проходження другого компонента система промені на виході з системи є паралельними оптичній осі.

Різниця між ходом променів в системі Кеплера та Галілея полягає лише в тому, що в системі Кеплера фокус F_2 другого компонента дійсний, на відміну від системи Галілея, де передній фокус F_2 уявний. На Рис. 1.5 та Рис. 1.6 ми можемо побачити, що обидві системи не мають ні переднього ні заднього фокусів, оскільки промені на вході в систему та виході з неї не перетинаються, а рухаються паралельно.

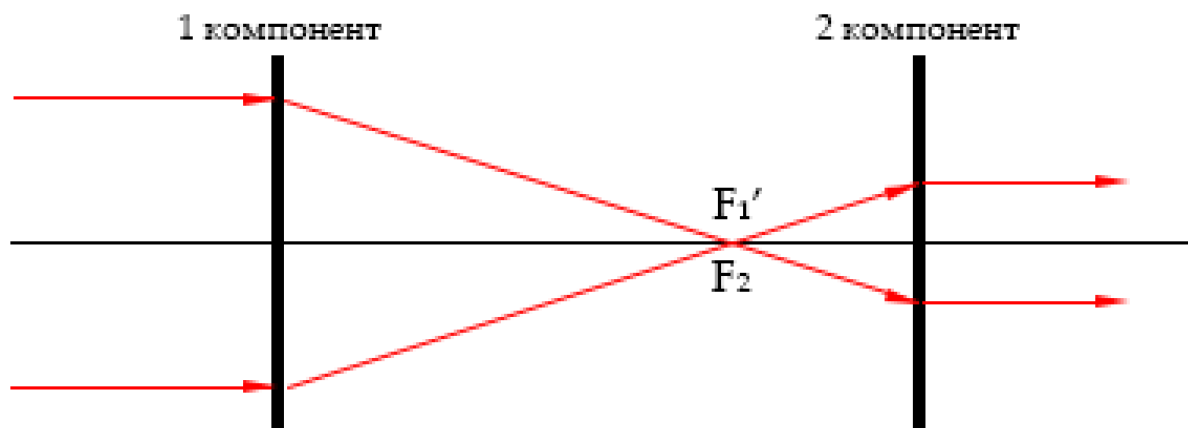


Рис. 1.5 – Хід променів осевого пучка у системі Кеплера

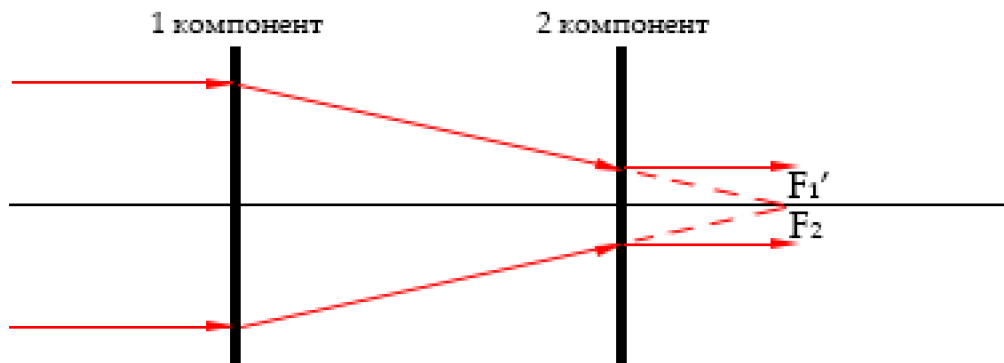


Рис. 1.6 - Хід променів осьового пучка у системі Галілея

На Рис. 1.7 та 1.8 зображено хід променів позаосьового пучка у системах Кеплера та Галілея. Пучок променів нахилений до оптичної осі на кут ω . Перший промінь проходить через передній фокус першого компонента оптичної системи, тому після цього він прямує паралельно оптичній осі. Напрямок другого променю не змінюється після проходження першого компонента системи, оскільки даний промінь проходить через головні-вузлові точки першого компонента. Обидва промені, після проходження першого компонента, перетинаються у задній фокальній площині цього компонента, яка одночасно є передньою фокальною площиною другого компонента, тому після проходження другого компонента промені повинні бути паралельними один відносно іншого.

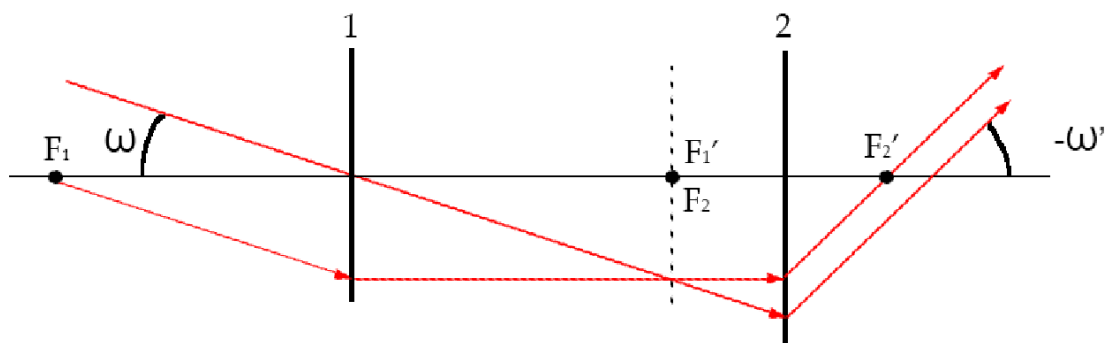


Рис. 1.7 – Хід променів позаосьового пучка у системі Кеплера

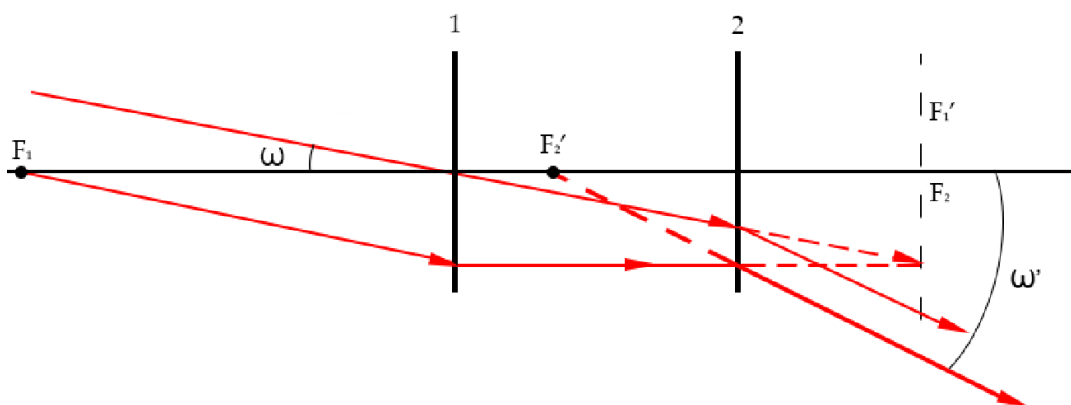


Рис. 1.8 – Хід променів позаосьового пучка у системі Галілея

Проаналізувавши хід променів позаосьового пучка в системах Кеплера та Галілея можна зробити певні висновки:

- Система Кеплера утворює перевернуте зображення предмету, оскільки пучки променів на вході та виході з системи мають протилежні знаки кутів нахилу ω і ω' ;
- Система Галілея утворює пряме зображення предмету, оскільки кути нахилу ω і ω' мають однаковий знак;
- При умові, що $|f'_1| > |f'_2|$, то кут нахилу пучка $|\omega'| > |\omega|$. Іншими словами це означає, що кутовий розмір зображення буде більшим ніж кутовий розмір предмету, відповідно й значення кутового збільшення афокальної системи буде більшим за одиницю. На основі цього принципу й були розроблені перші зорові труби, які дозволяли бачити віддалені предмети у збільшеному вигляді.

1.1.3 Основні параметри телескопічних систем

Параметри, які кількісно характеризують здатність системи виконувати свої основні та допоміжні функції, називають основними або ж функціональними параметрами оптичної системи. [6]

До основних функціональних параметрів телескопічних систем відносяться [5]:

- кутове (γ) та видиме (Γ) збільшення;
- кут поля зору в просторі предметів (ω) та в просторі зображень (ω');

- діаметр (D) вхідної зіниці та вихідної зіниці (D');
- розташування вихідної зіниці відносно останньої оптичної поверхні системи (t');
- просторова дифракційна (ψ_d) та візуальна (ψ_v) роздільні здатності телескопічної системи;
- корисне збільшення телескопічної системи ($\Gamma_{\text{кор}}$).

Наведені вище параметри також використовують при проектуванні афокальних систем у якості вихідних даних.

1.1.4 Розрахунок основних параметрів афокальної системи Кутове (γ) та видиме (Γ) збільшення афокальної системи

В загальному значення кутового збільшення можна описати виразом 1.2

$$\gamma = \frac{tg(\omega')}{tg(\omega)} \quad (1.2)$$

де кути нахилу пучка ω та ω' на вході і на виході з системи позначені на Рис. 1.9.

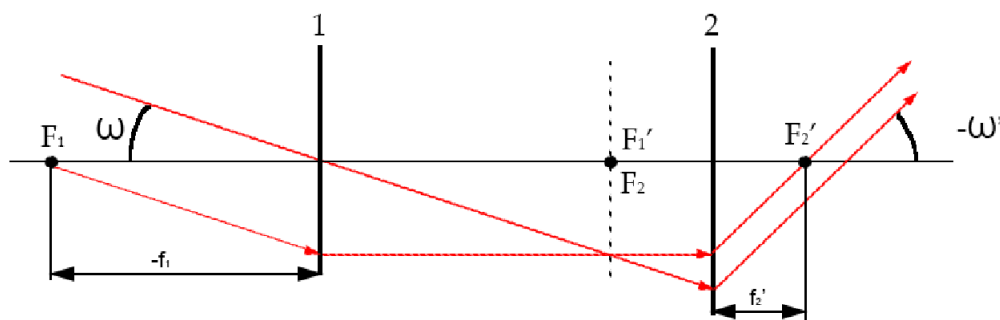


Рис. 1.9 – До визначення кутового збільшення

При розрахунку параметра кутового збільшення, тип оптичної системи не має значення, тому на Рис. 1.9 наведений приклад розрахунку для системи Кеплера. Провівши деякі геометричні розрахунки та перетворення, ми можемо представити вираз (1.2) у вигляді залежності від значень фокусних відстаней f_1' та f_2' оптичної системи, а не від кутів нахилу пучка. Така залежність описується виразом (1.3).

$$\gamma = -\frac{f_1'}{f_2'} \quad (1.3)$$

Видиме збільшення афокальної системи описується таким ж виразом, як кутове збільшення (вираз 1.2):

$$\Gamma = \frac{tg(\omega')}{tg(\omega)} \quad (1.4)$$

де ω кут, під яким предмет спостерігається неозброєним оком, а ω' кут, під яким око бачить предмет через зорову трубу. Коли відстань між предметом спостереження та зоровою трубою збільшується, то різниця між значеннями видимого збільшення Γ та кутового збільшення γ зменшується. На практиці значення γ і Γ часто вважають однаковими, тобто різницею між ними нехтують.

Кут поля зору (2ω) та ($2\omega'$)

Поле зору системи Кеплера

На Рис. 1.10 зображено афокальну систему Кеплера та позначено всі її діафрагми.

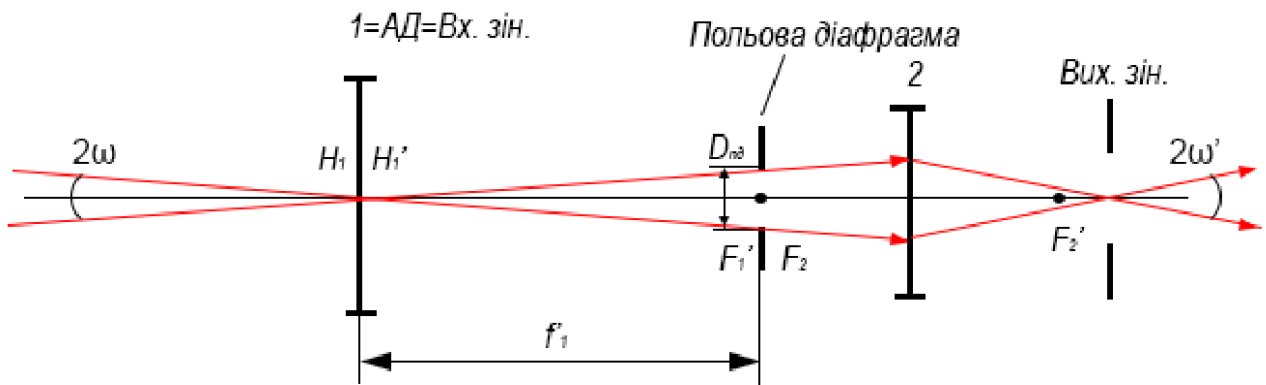


Рис. 1.10 – До визначення поля зору системи Кеплера

Формула для розрахунку поля зору в просторі предметів в радіанах, має вигляд [1]:

$$2\omega[\text{рад}] = 2\arctg\left(\frac{D_{\text{пд}}}{2f_{1'}}\right) \quad (1.5)$$

Для розрахунку поля зору в градусах [1]:

$$2\omega[\text{град}] = \frac{360}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{D_{\text{пд}}}{2f'_{1_1}} \right) \quad (1.6)$$

Кут поля зору в просторі зображень $2\omega'$ можна визначити використовуючи значення кутового збільшення афокальної системи. Формула для розрахунку поля зору в радіанах [1]:

$$2\omega'[\text{рад}] = 2\operatorname{arctg}(\gamma * \operatorname{tg}\omega) \quad (1.7)$$

Формула для розрахунку в градусах [1]:

$$2\omega'[\text{град}] = \frac{360}{\pi} \operatorname{arctg}(\gamma * \operatorname{tg}\omega) \quad (1.8)$$

Поле зору системи Галілея

В системі Галілея немає місця для польової діафрагми, тому потрібно визначити діафрагму, яка реально обмежує поле зору в системі. На Рис. 1.11 зображено систему Галілея з визначеними діафрагмами. З Рис. 1.11 можемо побачити, що в системі є дві діафрагми – оправа першого та оправа другого компонента. Окрім цього в системі діє ще одна діафрагма, а саме зіниця ока користувача зорової труби.

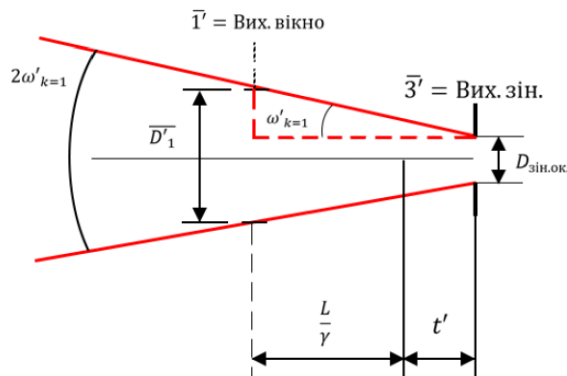


Рис. 1.11 – Система Галілея при значенні коефіцієнта $k=1$

Де k – коефіцієнт віньєтування системи

Кут поля зору в просторі предметів при $k = 1$ [1]:

$$2\omega_{k=1}[\text{рад}] = 2\operatorname{arctg} \left(\frac{D_1 - \gamma D_{\text{зін.ок.}}}{2\gamma(\gamma t' + L)} \right) \quad (1.9)$$

Для визначення кута поля зору в градусах використовуємо формулу [1]:

$$2\omega_{k=1}[\text{град}] = \frac{360}{\pi} \arctg \left(\frac{D_1 - \gamma D_{\text{зін.ок.}}}{2\gamma(\gamma t' + L)} \right) \quad (1.10)$$

Кут поля зору в просторі зображень при $k = 1$ [1]:

$$2\omega'_{k=1}[\text{рад}] = 2 \arctg \left(\frac{D_1 - \gamma D_{\text{зін.ок.}}}{2(\gamma t' + L)} \right) \quad (1.11)$$

Для визначення кута поля зору в градусах використовуємо формулу [1]:

$$2\omega'_{k=1}[\text{град}] = \frac{360}{\pi} \arctg \left(\frac{D_1 - \gamma D_{\text{зін.ок.}}}{2(\gamma t' + L)} \right) \quad (1.12)$$

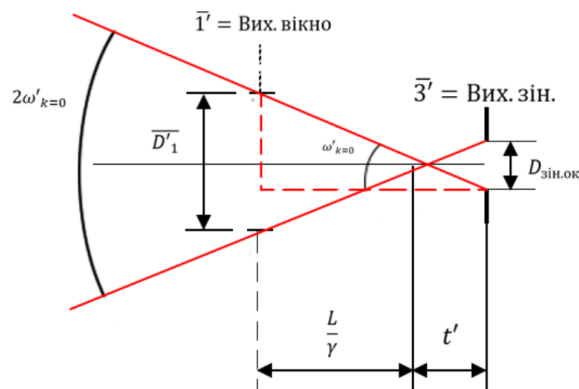


Рис. 1.12 – Система Галілея при значенні коефіцієнта $k=0$

Кут поля зору в просторі предметів при $k = 0$ [1]:

$$2\omega_{k=0}[\text{рад}] = 2 \arctg \left(\frac{D_1 + \gamma D_{\text{зін.ок.}}}{2\gamma(\gamma t' + L)} \right) \quad (1.13)$$

Для визначення кута поля зору в градусах використовуємо формулу [1]:

$$2\omega_{k=0}[\text{град}] = \frac{360}{\pi} \arctg \left(\frac{D_1 + \gamma D_{\text{зін.ок.}}}{2\gamma(\gamma t' + L)} \right) \quad (1.14)$$

Кут поля зору в просторі зображень при $k = 0$ [1]:

$$2\omega'_{k=0}[\text{рад}] = 2 \arctg \left(\frac{D_1 + \gamma D_{\text{зін.ок.}}}{2(\gamma t' + L)} \right) \quad (1.15)$$

Для визначення кута поля зору в градусах використовуємо формулу [1]:

$$2\omega'_{k=0}[\text{град}] = \frac{360}{\pi} \arctg \left(\frac{D_1 + \gamma D_{\text{зін.ок.}}}{2(\gamma t' + L)} \right) \quad (1.16)$$

Положення і діаметри вхідних та вихідних зіниць

Кількість світлового потоку, яка потрапляє в око і формує освітленість сітківки визначається *розмірами вхідної зіниці* афокальної системи. Даним параметром характеризується світлосила афокальної системи та суб'єктивна яскравість предметів, які спостерігаються оком. Також розміри вхідної зіниці впливають на дифракційну роздільну здатність афокальної системи. А діаметр вихідної зіниці має бути узгодженим зі значенням діаметра зіниці ока. Зважаючи на вищезгадані фактори можна зробити висновок, що розмір зіниць є важливим параметром афокальних систем.

Зіниці систем Кеплера та Галілея потрібно розглядати окремо, оскільки розподіл ролей між діафрагмами у цих системах суттєво відрізняється.

Для системи Кеплера

Положення зіниць

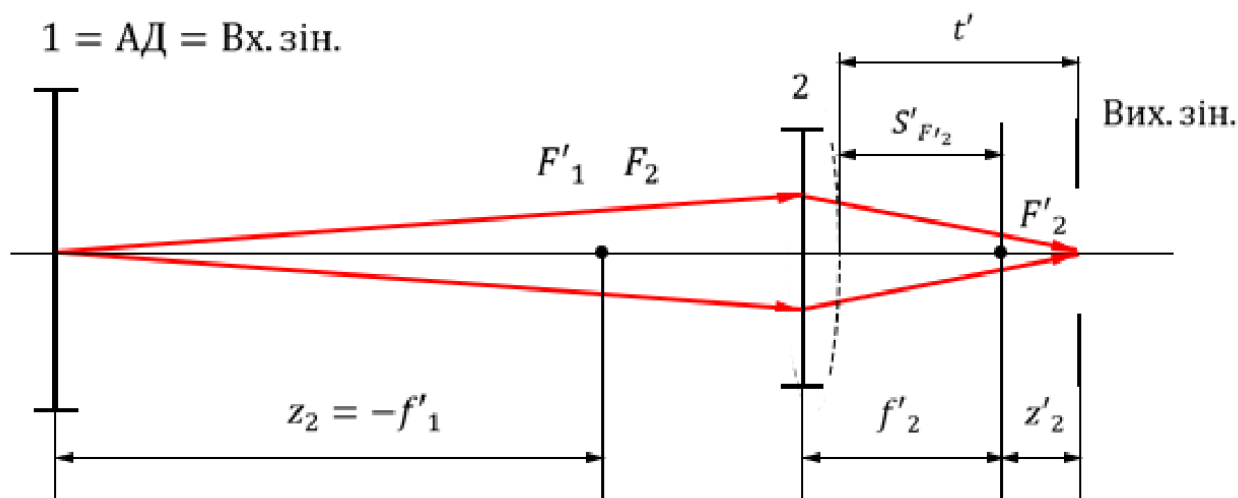


Рис. 1.13 – До розрахунку положення зіниць у системі Кеплера

Вихідна зіниця другого компонента системи віддалена на відрізок t' , відносно останньої оптичної поверхні окуляра. Даний відрізок складається з задньої фокальної відстані компонента 2 і відрізка z'_2 . Відрізок t' розраховується з використанням виразу 1.17:

$$t' = S'_{F'_2} + z'_2 = S'_{F'_2} - \frac{f'_2}{\gamma} \quad (1.17)$$

Кутове збільшення γ , у системі Кеплера, має від'ємний знак, тому другий доданок у виразі (1.17) додатній. Це означає, що вихідна зіниця знаходиться за заднім фокусом другого компонента.

Діаметри вхідної та вихідної зіниць

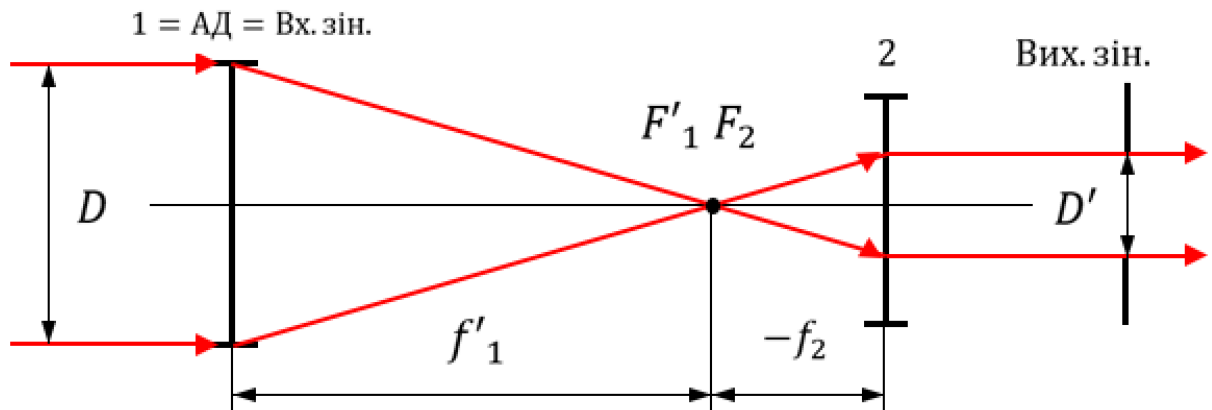


Рис. 1.14 – До розрахунку діаметру зіниць у системі Кеплера

Із Рис. 1.14 маємо:

$$\frac{D'}{D} = \left| \frac{f_2}{f'_1} \right| = \left| \frac{1}{\gamma} \right| \quad (1.18)$$

З виразу (1.18) знайдемо вираз для розрахунку діаметру вхідної та вихідної зіниць системи Кеплера:

$$D = D' \gamma \quad (1.19)$$

$$D' = \frac{D}{\gamma}$$

Діаметри вхідної та вихідної зіниць системи Галілея

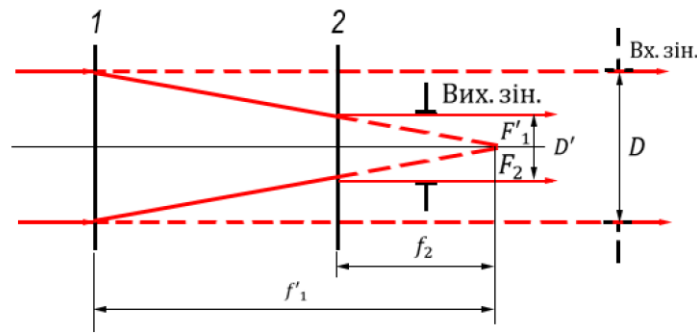


Рис. 1.16 – До розрахунку діаметру зіниць у системі Галілея

Із Рис. 1.16 можна встановити залежність:

$$\frac{D}{D'} = \left| \frac{f_1'}{f_2} \right| = \gamma$$

Звідси знаходимо формулу для розрахунку діаметру вхідної зіниці системи Галілея:

$$D = D' \gamma \quad \text{або} \quad D = \gamma D_{\text{зін.ок.}} \quad (1.21)$$

Просторова роздільна здатність афокальної системи

Здатність оптичної системи утворювати роздільні зображення двох точкових джерел називається *просторовою роздільною здатністю*. Кількісно роздільну здатність оптичної системи характеризують межею роздільної здатності. Дана межа визначається мінімальною лінійною або кутковою відстанню між двома точковими джерелами простору предметів.

Роздільна здатність в оптичній системі можлива завдяки дифракції світла на краях апертурної діафрагми оптичної системи, а також завдяки абераційним спотворенням зображень. У випадках коли оптична система не має аберацій, то її роздільна здатність залежить тільки від дифракції.

Згідно критерію Релея значення $\delta = r$. Тоді вираз для визначення кутової межі просторової роздільної здатності буде мати вигляд:

$$\psi[\text{рад}] = \frac{\delta}{f_1'} = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (1.22)$$

Корисне кутове або видиме збільшення

Якщо кут, через зростання значення γ чи Γ , досягає виконання умови $\psi' = \varepsilon$, то око бачить лише збільшене спотворене дифракцією зображення простору предметів. Більш дрібні деталі зображення вже є нерозбірливими, тому подальше збільшення значень γ чи Γ не має сенсу. Опираючись на це твердження можна дійти висновку, що кутове чи видиме збільшення телескопічної системи досягає свого корисного значення при $\psi' = \varepsilon$

В літературних джерелах дані щодо корисного видимого чи кутового збільшення телескопічної системи знаходяться в інтервалі значень

$$0.2D \leq \Gamma_{\text{кор}} \leq 0.5D.$$

Корисне збільшення розраховується за формулою:

$$\Gamma_{\text{кор}} = \frac{\varepsilon}{140'} D \quad (1.23)$$

1.2 Огляд інформації за темою “Варіолінзи”

1.2.1 Загальні положення про варіолінзи

Варіолінзи (рідкі лінзи або адаптивні лінзи) – це оптична система у якій фокус є контрольованим. Фокус, у варіолінзах, можна змінювати за допомогою різних чинників, таких як напруга, магнітне поле та інші.

Основні переваги варіолінзи:

- Швидкість відпрацювання;
- Низькі енерговитрати;
- Невеликі розміри;

Типи варіолінз

Виокремлюють 5 основних типи варіолінз, а саме:

1. Еластомерна мембранна лінза
2. Електрозмочувальна лінза
3. Діелектрофоретична лінза
4. Лінза з механічним змочуванням
5. Лінза ферофлюїдного датчика

У даній роботі більш детально розглянемо 2 типи лінз (еластомерна мембранна та електрозмочувальна лінзи), розглянемо їх будову, принцип роботи та познайомимось з основними характеристиками даних лінз.

1.2.2 Еластомерна мембранна лінза

Еластомерна мембранна лінза – це тип адаптивних лінз, виготовлених з гнучкого, гумоподібного матеріалу, який називається еластомером, який виконує роль межі поверхні лінзи. Сама ж лінза заповнюється рідиною, що дозволяє контролювати форму лінзи. Форма лінзи контролюється шляхом зміни об’єму або перерозподілу рідини в лінзі. Таким чином, змінюючи форму поверхні еластомерної мембранної лінзи можна контролювати показники фокусних відстаней таких лінз.

Матеріал еластичної мембрани

Основним компонентом варіолінз даного типу є еластична мембрана, тому потрібно приділяти багато уваги під час вибору матеріалу, з якого вона буде виготовлена. Ідеальний матеріал повинен задовольняти наступні властивості [2]:

1. *Висока пропускна здатність.*

Мембранна повинна забезпечувати високий коефіцієнт пропускання і малу колірну дисперсію у всій області спектра. При цьому поверхня мембрани має залишатися гладко як у розтягнутому стані, так і в стані спокою.

2. *Велике розтягнення.*

Під дією тиску на поверхню мембранни вона повинна розширюватися та розбухати до значної міри без пошкодження поверхні, а коли зусилля припиняється, розширена плівка має повернутися до своєї початкової форми без деформації.

3. *Хімічні властивості.*

Мембранна не повинна вступати у хімічну реакцію з рідиною, що використовується в лінзі, а також має бути стійкою до впливу ультрафіолету, щоб термін придатності лінзи не викликав занепокоєння.

4. *Фізичні властивості.*

Мембранна повинна бути стійкою до впливу ряду фізичних чинників, таких як температура та вологість, щоб при змінні умов навколишнього середовища залишатись стабільною та працездатною.

Останнім часом проводилось багато випробувань різних матеріалів для виготовлення еластичних мембран варіолінз, але на даний момент найкращим матеріалом залишається полідиметилсилоксан (ПДМС).

Найпоширенішим матеріалом для виготовлення еластомерних мембран є продукт компанії Dow-Corning - PDMS SYLGARD_184. Цей матеріал складається з двох компонентів: преполімеру, що є основою матеріалу, та зшиваючого компонента. Даний матеріал володіє низкою важливих характеристик, які є ключовими при виготовленні високоефективних лінз.

Головними перевагами матеріалу є:

- Висока оптична прозорість
- Велике подовження
- Біосумісність
- Термостійкість

Рідина для еластомерних мембранних лінз

Другим основним елементом у еластомерних мембранних лінзах є рідина, за допомогою якої контролюється форма лінзи. При виборі рідини потрібно звертати увагу на низку характеристик, які повинна задовольняти ідеальна рідина для лінзи. Основні властивості це [2]:

1. *Високий коефіцієнт пропускання.*

Високий коефіцієнт пропускання видимого світла має вирішальне значення для оптичної ефективності пристрою.

2. *Широкосмуговість.*

Обрана рідина повинна бути прозорою для білого світла з довжиною хвилі в діапазоні від 400 до 750 нм. Також рідина повинна бути прозорою для інфрачервоного світла. Це складне завдання, оскільки більшість рідин не настільки прозорі в ІЧ-області.

3. *Високий показник заломлення.*

Це забезпечить відносно велику зміну фокусуєної здатності, навіть якщо поверхня мембрани буде лише трохи змінена.

4. *Низька щільність.*

Це зменшить гравітаційний ефект, коли лінза розміщена у вертикальному напрямку.

5. *Відсутність хімічної реакції.*

Обрана рідина не повинна вступати в хімічну реакцію з мембраною. Крім того, рідина не повинна провокувати набрякання або стискання мембрани, щоб забезпечити довготривалу експлуатацію.

6. Відсутність випаровування.

Оскільки PDMS утворюється шляхом зшивання полімерної мережі, в мембрані завжди існують крихітні пори. Якщо мембрана занадто тонка (<40 мкм), то крихітні пори можуть проникнути всередину плівки. Тому вибір рідини, що випаровується, призведе до того, що рідина буде поступово випаровуватися через крихітні пори.

7. Низька в'язкість.

Для того, щоб досягти швидкого часу відгуку при зміні оптичної потужності, бажано використовувати рідину з низькою в'язкістю.

8. Не шкідлива і не має запаху.

У разі пошкодження мембрани рідина, що витікає, не повинна бути небезпечною для користувачів або навколишнього середовища.

Будова та принцип дії

Мембрани PDMS широко розповсюдженні для виготовлення оболонки варіолінз. Такі PDMS лінзи умовно можна розділити на два типи в залежності від їх будови. Для першого типу лінз характерним є розділення комірки та резервуару лінзи, а одну або дві трубки застосовують для їх з'єднання. Другий тип лінз виготовляється так, що камера лінзи і резервуар для рідини об'єднані разом. У центральній частині лінзи розташована камера, а резервуар знаходиться на периферії лінзи. Даний тип еластомерних лінз має більш компактну будову та більш легкий у керуванні її формою. [2]

Наочна демонстрація будови еластомерної лінзи (другого типу) наведена на Рис. 1.17.

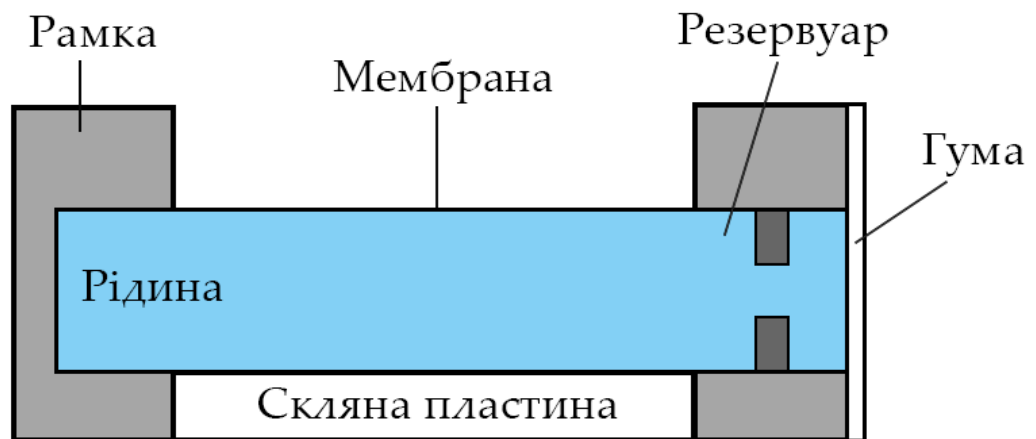


Рис. 1.17 – Будова еластомерної мембраної лінзи

Принцип дії еластомерних мембранних лінз простий і оснований на закачуванні та відкачуванні рідини у резервуарі лінзи. У стані релаксації зі стандартним об’ємом рідини у резервуарі ми маємо плоску поверхню мембрани. Для того, щоб отримати опуклу лінзу, у резервуар закачується рідина, що призводить до збільшення її об’єму і відповідно зміни форми мембрани як показано на Рис. 1.18(а). Відповідно при відкачуванні рідини її об’єм зменшиться, а поверхня мембрани буде “провисати”, так ми отримаємо увігнуту лінзу показану на Рис. 1.18(б).

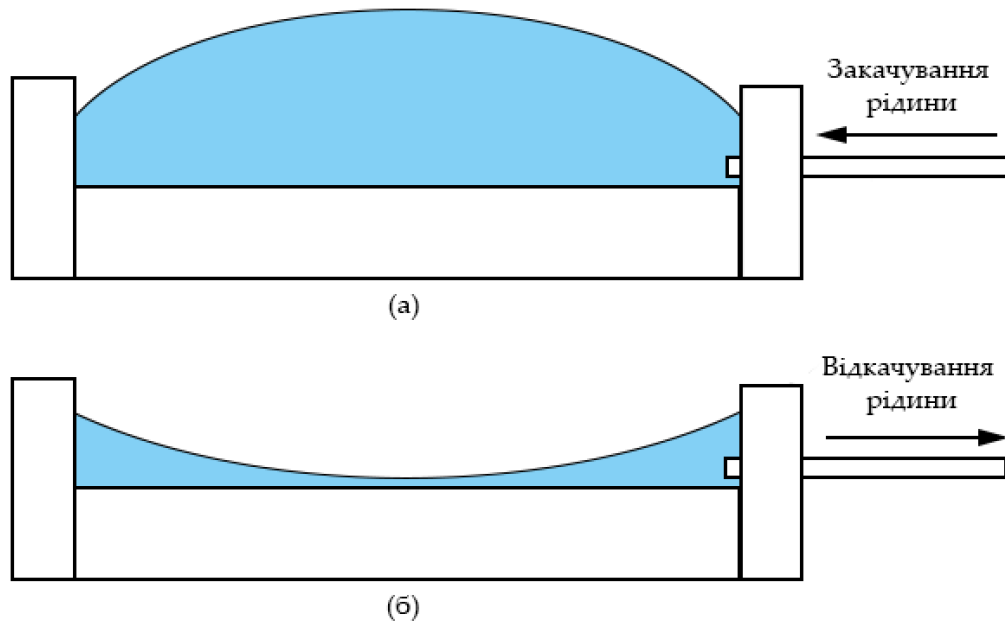


Рис. 1.18 – Принцип роботи еластомерних мембранних лінз

Приклади еластомерних мембранних лінз на ринку

Провідним постачальником еластомерних мембранних лінз є компанія Optotune. Об'єктиви цієї компанії представленні у декількох серіях з різними конфігураціями. Їх продукцію можна поділити на 3 основних групи [7]:

1. Об'єктив з електрорегулюванням (серія EL)
2. Об'єктиви з ручним налаштуванням (серія ML)
3. Електричні лінзові модулі (серії ELM-F і ELM-T).

Приклади лінз від Optotune



Рис. 1.19 – Лінза EL-3-10 [7]



Рис. 1.20 – Лінза EL-12-30-TC [7]

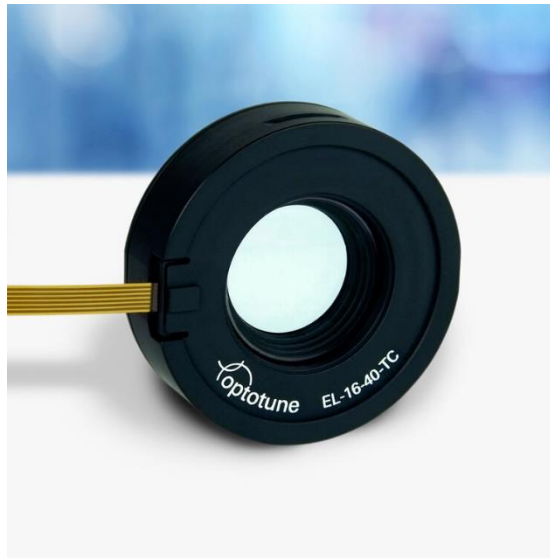


Рис. 1.21 – Лінза EL -16-40-TC [7]

У таблиці 1.1 наведено основні характеристики серій EL і ML від Optotune:

Таблиця 1.1 - Об'єктиви Optotune та їх характеристики [7]

Серія продукції	Опис продукту	Прозорий отвір (мм)	Розмір ØxH (мм)	Тип лінзи	Діапазон оптичної потужності (dpt)	Показник заломлення
СКК	Рішення для компактних лінз	1,3 - 4,4	Можливість налаштування			1,30 або 1,45
ЕЛ-3-10	Електрорегульована лінза	3	10 x 4,0	Від плоскоопуклого до плоскоувігнутого	від -13 до +13	1.30
ЕЛ-10-42-ОФ	Електрорегульована лінза	10	42 x 41	Плоскоопукла + плоскоувігнута офсетна лінза з оптичним зворотним зв'язком (OF)	від -2 до +2	1.30
ЕЛ-12-30-ТС	Електрорегульована лінза	12	30 x 5,8	Від плоскоопуклого до плоскоувігнутого	від -6 до +10	1.45

ЕЛ-16-40-ТС	Електрорегульована лінза	16	40 x 11,9	Від плоскоопуклого до плоскоувігнутого	-2 до +3 -10 до +10	1.30
МЛ-20-37	Об'єктив з ручним налаштуванням	20	37 x 13,2	Від плоскоопуклого до плоскоувігнутого	-18 до +18	1.38

1.2.3 Електрозмочувальна лінза

Якщо невелика кількість електроліту, наприклад солоної води, капає на електроізоляційний шар діелектрика, то на поверхні шару утворюється крапля. У випадку, якщо кут контакту (кут змочування), між діелектричним шаром та провідною рідиною, можна змінити під впливом зовнішньої напруги, то це явище визначається як ефект електрозмочування. Контролюючи форму поверхні краплі рідини або переміщуючи положення рідини, було розроблено та продемонстровано багато пристроїв принцип дії яких базується на ефекті електрозмочування. Використання даного ефекту знайшло застосування у різних галузях, зокрема і в адаптивній оптиці. Так техніка електрозмочування була успішно використана для виготовлення варіолінз. Порівнюючи з PDMS лінзами (еластомерні мембранні лінзи), електрозмочувальні лінзи є більш привабливими, оскільки приводяться в дію не механічним шляхом, а електричним. Оскільки електричні прилади досить швидко розвиваються, в сучасному світі, а вимоги до концептуальних пристроїв постійно зростають, то електрозмочувальні лінзи знаходять собі місце в широкому спектрі застосувань, таких як камери мобільних телефонів, оптичні модулятори, оптоволоконні перемикачі, підсилювачі, системи машинного зору і дисплеї. [8]

Основні характеристики електрозмочувальних варіолінз

- **Час відгуку**

Рідинні лінзи мають дуже швидкий час відгуку, їх можна електрично налаштувати за допомогою напруги або струму, і вони реагують за лічені мілісекунди. Об'єктиви з фіксованою фокусною відстанню і зумом

часто покладаються на механічне або ручне регулювання для зміни фокусу, що може сповільнювати роботу системи візуалізації.

- **Універсальність**

Рідинні лінзи можуть бути встановлені в різних місцях системи формування зображень, наприклад, вбудовані в об'єктив або прикріплені до передньої або задньої частини об'єктива.

- **Розмір**

У рідких лінзах відсутня механіка, що забезпечує їх компактний дизайн. Крім того, за функціональністю рідкі лінзи можна порівняти з багатьма окремими лінзами у складі об'єктива. Видалення цих лінз і заміна їх на невелику рідку комірку дозволяє зменшити загальний розмір і вагу всього об'єктива.

- **Покриття сенсора**

Рідинні лінзи обмежені малими розмірами апертури - найбільша діаметром приблизно 16 мм. Малі апертури обмежують застосування рідких лінз і дозволяють використовувати їх з датчиками розміром до 1/1,8 дюйма, тільки якщо лінза встановлюється на передню частину існуючого об'єктива системи машинного зору. Рідинні лінзи, вбудовані всередину системи, не зменшують покриття датчика.

- **Фокусування**

Рідкі лінзи розроблені для роботи в дуже широкому діапазоні оптичних потужностей (фокусних відстаней) на високих швидкостях. Завдяки відсутності рухомих частин і механічних регулювань, які зазвичай притаманні об'єктивам з фіксованою фокусною відстанню і зумом, процес фокусування відбувається швидше.

- **Складність інтеграції**

Залежно від наявного обладнання та сфери застосування, інтеграція рідинних лінз може бути складною. Рідинні лінзи можна використовувати разом з багатьма аксесуарами, такими як фільтри та діафрагми, які потрібні

для багатьох високошвидкісних додатків, наприклад, датчиків відстані або контролерів.

- **Термін служби**

Рідинні лінзи споживають дуже мало енергії. Типові механічні лінзи здатні витримати ~100 000 циклів, тоді як рідкі лінзи витримують приблизно ~50 000 000 циклів.

Будова та принцип дії

На Рис. 1.22 можемо ознайомитись з будовою електрозмочувальних лінз. Розглядаючи структуру лінзи, бачимо, що вона складається з нижньої підкладки, провідної краплі, оточеної ізолюючою рідиною, і верхніх підкладок. Внутрішня поверхня нижньої підкладки покрита ІТО (інтерцифрований оксид індію-олова) електродом. Також поверхня електрода покрита шаром діелектрика, щоб запобігти прямого контакту електрода з провідною рідиною. Для забезпечення найбільшого кута змочування, між провідною краплею та нижньою підкладкою, використовують діелектрик, який володіє гідрофобними властивостями. Коли між краплею і електродом подається напруга, провідна крапля розширюється на поверхні нижньої підкладки, як показано на Рис. 1.22(б). Це відбувається через те, що протилежні заряди, які накопичуються на обох поверхнях діелектричного шару, подібні до структури, яка показана на Рис. 1.23. Електростатична сила направлена на те, щоб придати краплі новий баланс форми. Відповідно кут контакту, а також і профіль поверхні краплі зміниться. Форма краплі буде залежати від амплітуди прикладеної напруги [2].

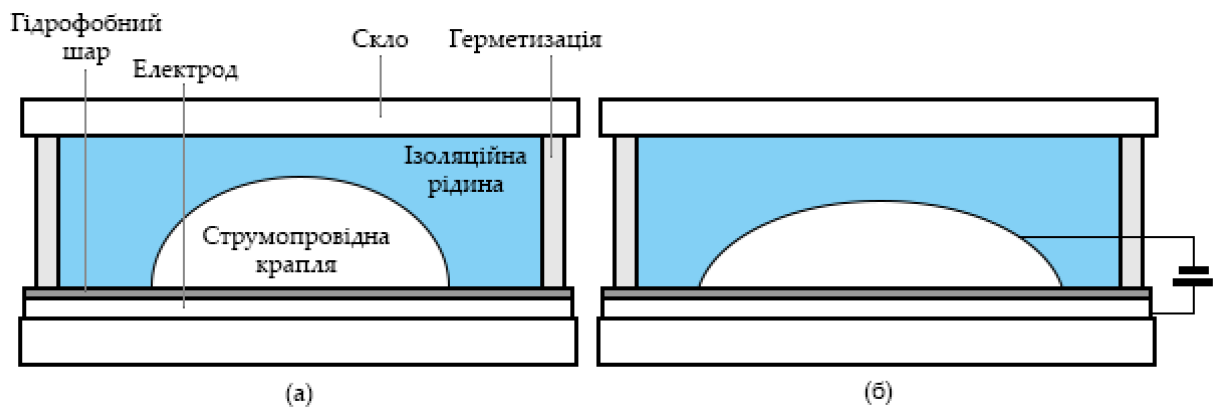


Рис. 1.22 – Будова та принцип дії електрозмочувальної лінзи

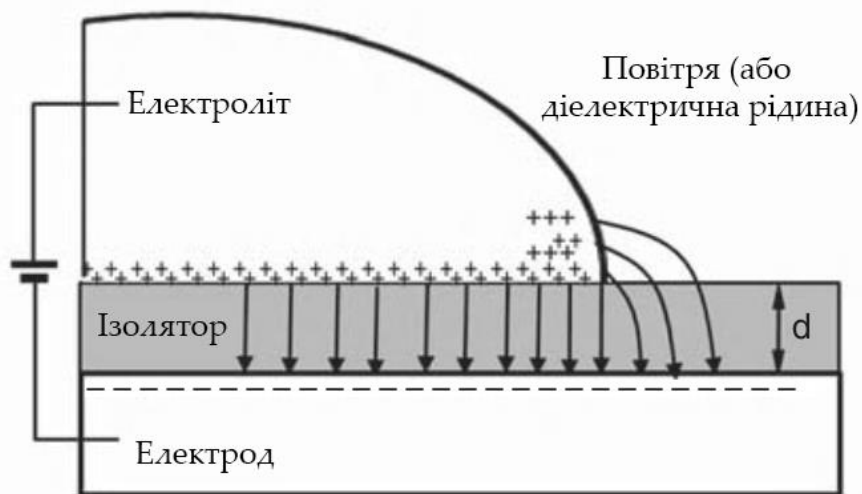


Рис. 1.23 - Електроосадження на електродах з ізоляційним покриттям

Розглянемо більш детально структуру рідинних лінз з ефектом електрозмочування. Важливою умовою є міцне закріплення краплі на нижній поверхні підкладки, щоб під час роботи вона не вібрувала. На Рис. 1.24(а) наочно показано структуру лінзи, яка складається з двох рідин. Сама ж лінза складається з циліндричної камери, яка заповнена діелектричною олією та водою, яка виконує роль провідника. Між двома рідинами знаходиться меніск, він визначає межу показника заломлення і тому поводить себе як лінза. Провідна рідина (у нашому випадку вода) безпосередньо контактує з нижнім електродом. Внутрішня поверхня камери покрита діелектричним шаром, зовні даного шару розташований стовпчастий електрод. Між стовпчастим і нижнім електродами має бути достатній зазор, оскільки висота стовпчастого електрода достатньо

велика, щоб у нього була задіяна меніскова поверхня рідини. На Рис. 2.8(б) можна розглянути структуру стовпчастого електрода, який покриває периферію камери. На Рис. 1.25 зображено структуру лінзової камери збоку та механізм її роботи. Поверхню діелектричного шару покривають гідрофобним матеріалом, це робиться для того, щоб отримати великий кут змочування. Внутрішній стовпчастий електрод виходить назовні і з'єднується з покриттям електрода на зовнішній бічній поверхні. При умові, що показник заломлення ізолюючої рідини більший за показник заломлення провідної рідини, то лінза поводить себе як увігнута (розсіювальна). Після проходження через межу розподілу фаз світло буде розходитися як зображено на Рис. 1.25(а). Якщо до електродів прикласти напругу, то на зовнішній і внутрішніх поверхнях ізолятора будуть накопичуватись протилежні заряди. Оскільки гідрофобний шар має властивість підвищеного поверхневого натягу, тому вода сильно змочується завдяки чому форма краплі значно змінюється. Керуючи амплітудою напруги, можна досягти плоскої форми межі розподілу двох рідин (Рис. 1.25(б)). При плоскій формі рідини комірка втрачає властивості лінзи і світло проходить крізь неї без заломлення. Якщо продовжити збільшувати напругу вода стає ще більш змочуваною і набуває увігнутої форми. [8] За такої умови комірка лінзи поводить себе як опукла лінза (збиральна), а падаюче світло поводить себе, як на Рис. 1.25(в).

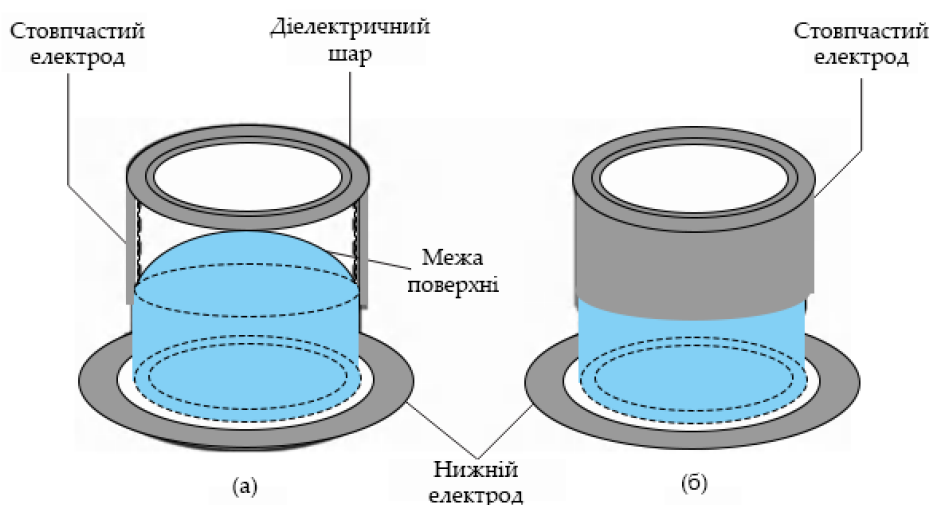


Рис. 1.24 – Структура лінзи, яка складається з 2 рідин

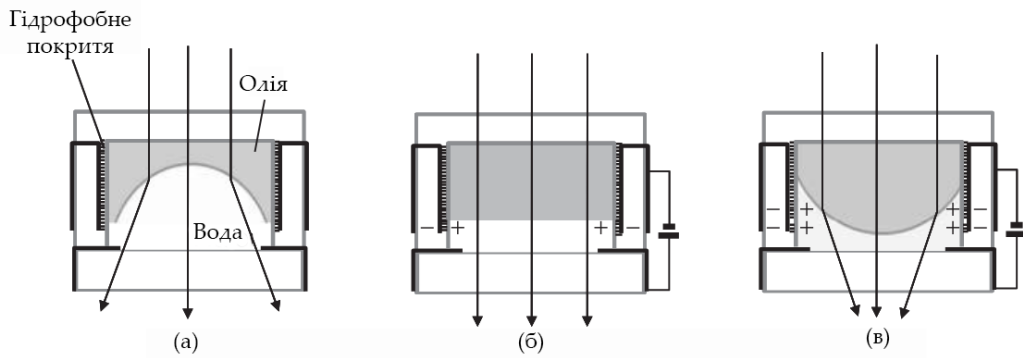


Рис. 1.25 – Хід променів в електрозмочувальних лінзах

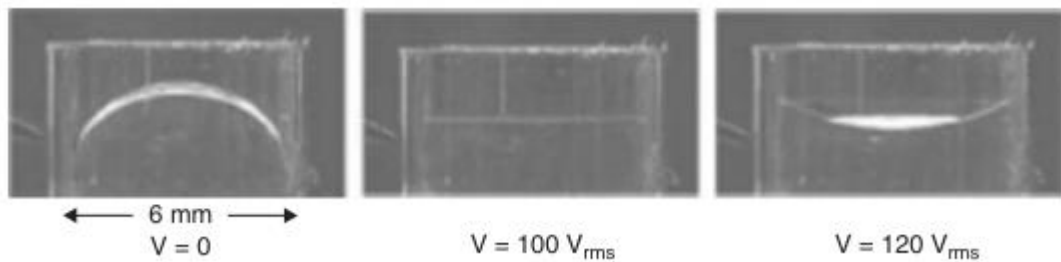



Рис. 1.26 – Форма води в залежності від напруги [2]


Лінзи на основі методу електрозмочування від виробника Varioptic

Varioptic – це компанія, яка займається випуском електрозмочувальних лінз. Їх продукція володіє високою якістю, а великий спектр вибору лінз дозволяє знайти продукт під будь-яку задачу. На даний момент компанія Varioptic випускає 3 серії адаптивних лінз, а саме [10]:

- Лінзи зі змінним фокусом серії А
- Лінзи зі змінним фокусом серії AP
- Лінзи зі змінним фокусом серії A-PE

Таблиця 1.2 - Приклади та характеристика лінз від Varioptic [9]

	<p>ARCTIC 316</p>	<p>Рідкокристалічні лінзи серії ARCTIC 316 призначені для застосувань, що вимагають швидкого відгуку і високої оптичної потужності. Вони особливо добре підходять для промислового застосування.</p>
---	--------------------------	--

	<p>ARCTIC 314 V2</p>	<p>ARCTIC 314 від Varioptic був спеціально розроблений для застосувань, де розмір має вирішальне значення. Він має меншу висоту в порівнянні з Arctic 316, а його знижена напруга (42 В) дозволяє використовувати драйвер Maxim, який є меншим і має меншу кількість зовнішніх компонентів.</p>
---	-----------------------------	---

Для порівняння характеристик лінз від Varioptic візьмемо декілька продуктів А-серії та наведемо основні параметри у порівняльній таблиці.

Варіолінза А-16F

Лінза зі змінним фокусом А-16F є найновішим і найменшим членом сімейства А-Series, а також найменшим об'єктивом, який доступний на даний момент. Він спеціально розроблений для ультракомпактних камер, таких як двигуни штрих-кодів.



Рис. 1.27 – Адаптивна лінза А-16F [11]

Варіолінза А-25Н

Лінза зі змінним фокусом А-25Н чудово підходить для систем з невеликою площею, що потребують швидкого відгуку та великого діапазону фокусування, і особливо підходить для мініатюрних промислових камер. Вона забезпечує

швидкий вихід на ринок для розробників продуктів, яким потрібне просте для інтеграції високоефективне рішення для автоматичного фокусування.



Рис. 1.28 – Адаптивна лінза А-25Н [11]

Варіолінза А-39N

Лінза зі змінним фокусом А-39N розроблена спеціально для виробів зі змінним фокусом, яким потрібна велика чітка діафрагма, об'єктиви з довгим фокусом, великі датчики, лінзи об'єктива з кріпленням С, формування лазерного променя тощо. Вона ідеально підходить для таких застосувань, як промислове бачення, оптичне обладнання та біометричні пристрої.



Рис. 1.29 – Адаптивна лінза А-39N [11]

Варіолінза А-58N

Лінза зі змінним фокусом А-58N має велику діафрагму з широким динамічним діапазоном і низький WFE (тип. $0,1\lambda$, макс. $0,2\lambda$), без шкоди для форм-фактора чи простоти інтеграції.



Рис. 1.30– Адаптивна лінза А-58N [11]

Розглянемо основні параметри лінз Varioptic у порівняльній таблиці 1.3:

Таблиця 1.3 - Характеристики лінз Varioptic [11]

Типова продуктивність при 25°C	A-16F	A-25N	A-39N	A-58N
Прозора діафрагма	1,6 мм	2,5 мм	3,9 мм	5,8 мм
Мінімальна оптична сила	-5 дптр			
Максимальна оптична сила	+15 дптр	+13 дптр	+15 дптр	+10 дптр
Оптична якість	20 нм	30 нм	50 нм	80 нм
Передача на 587 нм	97%			
Передача на 850 нм	97%			
Споживана потужність	1 мВт			
Механічні розміри				
Зовнішній діаметр	6,2 мм	7,75 мм	13 мм	13 мм
Товщина (заднє вікно до передньої лінзи)	1,7 мм	1,7 мм	4,05 мм	4,22 мм
Загальна товщина	1,8 мм	2,1 мм	4,25 мм	4,32 мм

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Розглянуто основні теоретичні відомості про афокальні (телескопічні) оптичні системи. Описані типи афокальних систем, розібрано переваги та недоліки кожного типу цих систем. Описано хід променів в афокальних системах, що допоможе при проектуванні оптичної схеми розширювача лазерного пучка в наступному розділі. Також у першому розділі було описано особливості габаритного розрахунку телескопічної системи та визначені основні вирази для розрахунків у наступному розділі.

У даному розділі написано теоретичні матеріали про варіо-лінзи. Головна інформація, яка наведена у першому розділі – це основні типи варіо-лінз, особливості роботи та будова кожного розглянутого типу варіо-лінз, огляд конкретних варіантів варіо-лінз, які доступні на ринку та порівняльна характеристика варіо-лінз. Також при огляді інформації про варіо-лінзи було складено таблиці з технічними характеристиками найбільш поширених варіо-лінз, що допоможе при виборі варіо-лінз на наступному етапі дипломної роботи.

Інформація наведена у першому розділі дає змогу широко ознайомитись з необхідною теоретичною інформацією про зум-афокальні оптичні системи та варіо-лінзи, що дозволить в повній мірі виконати завдання наступного розділу і розробити розширювач лазерного променя задовольнивши вимоги технічного завдання.

РОЗДІЛ 2. ГАБАРИТНИЙ РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОЇ ЗУМ-АФОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З ОБГРУНТУВАННЯМ ВИБОРУ МОДЕЛІ ВАРІОЛІНЗ І ОПИСОМ ПРИСТРОЇВ КЕРУВАННЯ (ДРАЙВЕРІВ) ОПТИЧНИМИ СИЛАМИ ВАРІОЛІНЗ.

2.1 Завдання розділу та вихідні дані

У даному розділі розглядається розрахунок та розробка оптичної зум-афокальної системи розширювача лазерного променя на варіо-лінзах. Головними завданнями розділу є:

1. Обґрунтування вибору та взаєморозташування варіо-лінз, при яких виконуються вимоги технічного завдання
2. Оцінка поля зору зум-афокальної системи при відсутності він'єтування променів лазерного пучка.
3. Складання оптичної схеми, яка складається з лазерного діода та двох варіо-лінз.
4. Складання функціональної схеми комп'ютерно-інтегрованої зум-афокальної системи, яка складається з варіо-лінз, механічних елементів, елементів керування оптичною силою варіо-лінз та комп'ютера, який подає керуючі сигнали.

Вихідні дані до роботи:

1. Лазерний діод – Nichia NDS4116
2. Довжина хвилі – 488 нм
3. Діаметр лазерного пучка на вході в систему – 4 мм
4. Кутова розбіжність лазерного пучка на вході в систему – 0.2 мрад
5. Кутова розбіжність лазерного пучка на виході з системи – 0.05 мрад
6. Максимально допустимий осьовий габарит оптичної системи (в тонких компонентах) – 200 мм

2.2 Вибір типу зум-афокальної системи для габаритного розрахунку оптичної системи

Зум-афокальні системи – це телескопічні системи з можливістю регулювання кутового збільшення. Одним з прикладів застосування таких систем є розширювачі лазерного пучка, на прикладі якого буде більш детально розібрано зум-афокальні системи далі у роботі. Коли в зум-афокальних системах використовують компоненти у яких значення оптичних сил є фіксованим то зміна кутового збільшення відбувається завдяки переміщенню оптичних компонентів уздовж оптичної осі. У даній роботі буде розглянуто можливість створення зум-афокальної системи з використанням нерухомих оптичних компонентів. Для реалізації даної умови у якості оптичних компонентів будемо використовувати варіо-лінзи.

Як було зазначено у Розділі 1, існує 2 типи афокальних систем, а саме системи Кеплера та Галілея. Головною перевагою системи Галілея є те, що вона створює пряме зображення, в той час як система Кеплера – перевернуте. В системі Галілея роль апертурної діафрагми виконує зіниця ока або рамка матричного фотоприймача. Основні недоліки, які можна виділити у системах Галілея, це відсутність польової діафрагми, яка присутня у системі Кеплера і яка виконує роль різкого обмеження поля зору. Натомість цю роль у системі Галілея виконує він'єтна діафрагма, тому поле зору не має різкого обмеження. Також варто зазначити, що при однакових значеннях кутового збільшення для систем Кеплера та Галілея, кутовий розмір поля зору системи Галілея суттєво менший.

Проаналізувавши вище описані особливості кожної телескопічної системи, можна зробити висновок, що для подальшого розрахунку у роботі буде використовуватись саме система Галілея, оскільки вона має низку переваг та є більш зручною для проведення обчислень.

Зум-афокальна система за схемою Галілея

На Рис. 2.1 зображено систему Галілея, у якій перший оптичний компонент з додатною оптичною силою ($\Phi_{1\text{вар}} > 0$), а другий з від'ємною ($\Phi_{2\text{вар}} < 0$).

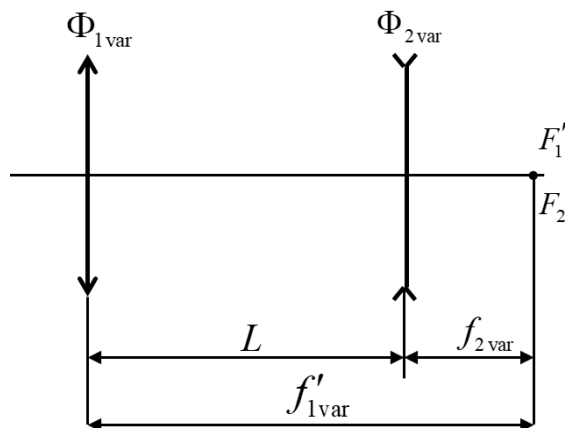


Рис. 2.1 – Оптична система Галілея

З Рис. 2.1 бачимо, що

$$L = f'_{1\text{вар}} - f_{2\text{вар}} = f'_{1\text{вар}} + f'_{2\text{вар}} = \frac{1}{\Phi_{1\text{вар}}} + \frac{1}{\Phi_{2\text{вар}}} \quad (2.1)$$

Кутове збільшення афокальної системи:

$$\gamma = -\frac{f'_{1\text{вар}}}{f_{2\text{вар}}} = -\frac{\Phi_{2\text{вар}}}{\Phi_{1\text{вар}}} \quad (2.2)$$

Об'єднавши рівняння (2.1) і (2.2) у систему, можемо знайти вираз для знаходження оптичної сили компонентів:

$$\Phi_{1\text{вар}} = \frac{\gamma-1}{\gamma L} \quad (2.3)$$

$$\Phi_{2\text{вар}} = \frac{\gamma-1}{L} \quad (2.4)$$

В діоптріях:

$$\Phi_{1\text{вар}} [\text{дптр}] = \frac{1000(\gamma-1)}{\gamma L}, \quad \Phi_{2\text{вар}} [\text{дптр}] = \frac{1000(\gamma-1)}{L}$$

Дослідивши оптичну систему, яка складається з двох однакових варіолінз, можна побачити, що значення кутового збільшення залежать від осьової довжини

системи. Підтвердженням цьому є графіки залежності $\Phi_{1 \text{ вар}}(\gamma)$ і $\Phi_{2 \text{ вар}}(\gamma)$ від кутового збільшення системи γ . З Рис. 2.2 та формул (2.3) і (2.4) видно, що розширення діапазону кутового збільшення можливе завдяки збільшенню значення L та розширенню робочого діапазону оптичної сили варіо-лінз Φ .

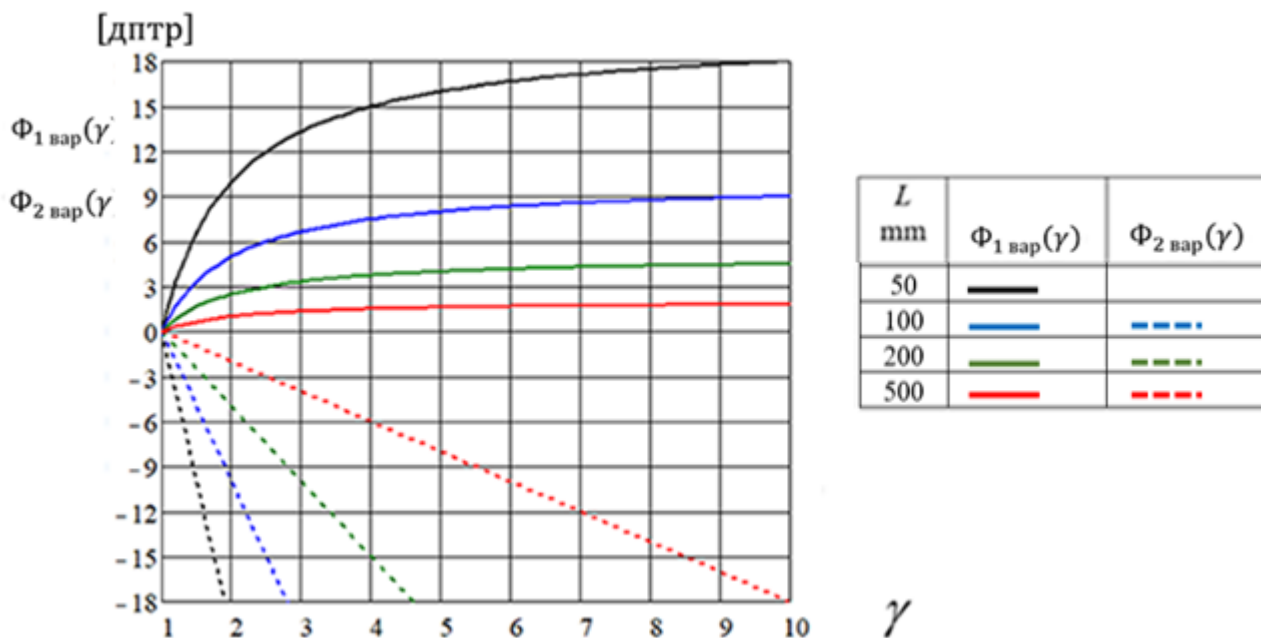


Рис. 2.2 – Графік залежності оптичної сили варіолінзи від кутового збільшення

2.3 Вибір варіо-лінз, розрахунок їх параметрів та побудова оптичної схеми

За умовою завдання маємо промінь лазера з діаметром 4 мм та максимально допустиму довжину оптичної системи $L=200$ мм. Як вже було сказано вище, максимальне значення кутового збільшення можна отримати використовуючи максимальне допустиме значення L . Використовуючи графік зображений на Рис. 2.2 та вищенаведені формули для розрахунків афокальної системи Галілея було проведено розрахунки для вибору варіолінзи, яка задовольняє технічні вимоги завдання.

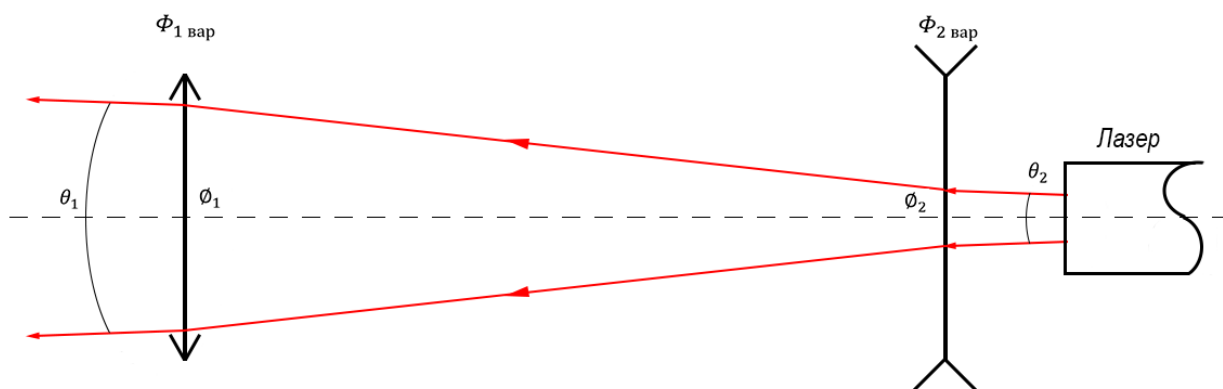


Рис. 2.3 – Проходження лазерного пучка через афокальну систему

Пучок який виходить з лазера має діаметр ϕ_2 та кутову розбіжність θ_2 . Після проходження через афокальну систему діаметр пучка і кутова розбіжність змінюються та мають значення ϕ_1 та θ_1 відповідно. Наочно проходження пучка лазера через афокальну систему зображено на Рис. 2.3.

Із теорії телескопічної системи Галілея маємо:

$$\gamma = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} \quad (2.5)$$

Згідно вихідних даних до завдання маємо лазер Nichia NDS4116 (Рис. 2.4) з якого виходить пучок діаметром $\phi_2 = 4$ мм та з кутовою розбіжністю $\theta_2 = 0,2 * 10^{-3}$ рад. Кутову розбіжність пучка потрібно плавно зменшити до значення $\theta_1 = 0,05 * 10^{-3}$ рад. Скориставшись виразом (2.5), отримаємо:

$$\gamma = \frac{0,2 * 10^{-3}}{0,05 * 10^{-3}} = 4$$

Опираючись на вищенаведені розрахунки та твердження, можемо зробити висновок, що значення кутового збільшення γ в оптичній системі, що зображена на Рис. 2.3, має змінюватись від 1 до 4.

Розрахуємо значення оптичної сили для першої варіолінзи при значеннях $\gamma = 1$ та $\gamma = 4$ використовуючи формули (2.3) та (2.4).

$$\phi_{1 \text{ вар}} [\text{дптр}] = |_{\gamma=1} = \frac{1000(\gamma - 1)}{\gamma L} = \frac{1000(1 - 1)}{L} = 0$$

$$\Phi_{1 \text{ вар}}[\text{дптр}] = |_{\gamma=4} = \frac{1000(\gamma - 1)}{\gamma L} = \frac{1000(4 - 1)}{4L} = \frac{750}{L}$$

Також розрахуємо відповідні значення для другої варіолінзи:

$$\Phi_{2 \text{ вар}}[\text{дптр}] = |_{\gamma=1} = \frac{1000(1 - \gamma)}{L} = \frac{1000(1 - 1)}{L} = 0$$

$$\Phi_{2 \text{ вар}}[\text{дптр}] = |_{\gamma=4} = \frac{1000(1 - \gamma)}{L} = \frac{1000(1 - 4)}{L} = \frac{-3000}{L}$$

Розрахуємо тако діаметри пучка на виході з системи, щоб підібрати варіолінзи, які будуть використовуватись для побудови оптичної системи.

$$\Phi_1 = |_{\gamma=1} = \Phi_{\text{п}} * \gamma = 4 * 1 = 4 \text{ мм}$$

$$\Phi_1 = |_{\gamma=4} = \Phi_{\text{п}} * \gamma = 4 * 4 = 16 \text{ мм}$$

Такий світловий діаметр може забезпечити лише лінза ML-20-37 (Рис. 2.5), тому обираємо її. Робочий діапазон оптичної сили даної лінзи ± 18 дптр.



Рис. 2.4 – Лазерний діод Nichia NDS4116 [12]

Таблиця 2.1 – Характеристики лазера Nichia NDS4116

Діаметр основи (мм)	Максимальна довжина хвилі (нм)	Вихідна оптична потужність (мВт)
5.6	488	60



Рис. 2.5 – Варіолінза ML-20-37 [13]

Таблиця 2.2 – Характеристики варіолінзи ML-20-37

Діаметр прозорого отвору (мм)	Діаметр варіолінзи в оправі (мм)	Товщина варіолінзи (мм)	Діапазон оптичних сил (дптр)
20	37	13.2	-18 до +18

Розрахуємо мінімальне значення довжини оптичної системи у випадках коли значення оптичних сил варіолінз максимальні.

Для додатної варіолінзи при $\gamma = 4$:

$$\frac{750}{L_{min}} = 18 \rightarrow L_{min} = \frac{750}{18} = 41,7 \text{ мм}$$

Для від'ємної варіолінзи при $\gamma = 4$:

$$\frac{-3000}{L_{min}} = -18 \rightarrow L_{min} = \frac{-3000}{-18} = 166,7 \text{ мм}$$

Згідно технічного завдання довжина системи не повинна перевищувати 200 мм, цю величину можна вважати кінцевою, тому розрахуємо максимальні значення оптичних сил варіолінз при $L = 200$ мм:

$$\Phi_{1 \text{ макс}} [\text{дптр}] = \frac{750}{200} = 3,75 \text{ дптр}$$

$$\Phi_{2 \text{ макс}} [\text{дптр}] = \frac{-3000}{200} = -15 \text{ дптр}$$

Для усіх значень кутового збільшення γ , які використовуватимуться у роботі, значення оптичної сили наведені у таблиці 2.3 у відповідності з графіком Рис. 2.2.

Таблиця 2.3 Оптичні сили варіолінз

Кутове збільшення (γ)	Φ_1 вар [дптр]	Φ_2 вар [дптр]
1	0	0
1.5	1,67	-2,5
2	2,5	-5
2.5	3	-7,5
3	3,33	-10
3.5	3,57	-12,5
4	3,75	-15

На основі вище наведених розрахунків було побудовано оптичну схему розширювача лазерного пучка. Оптична схема зображена на Рис. 2.6

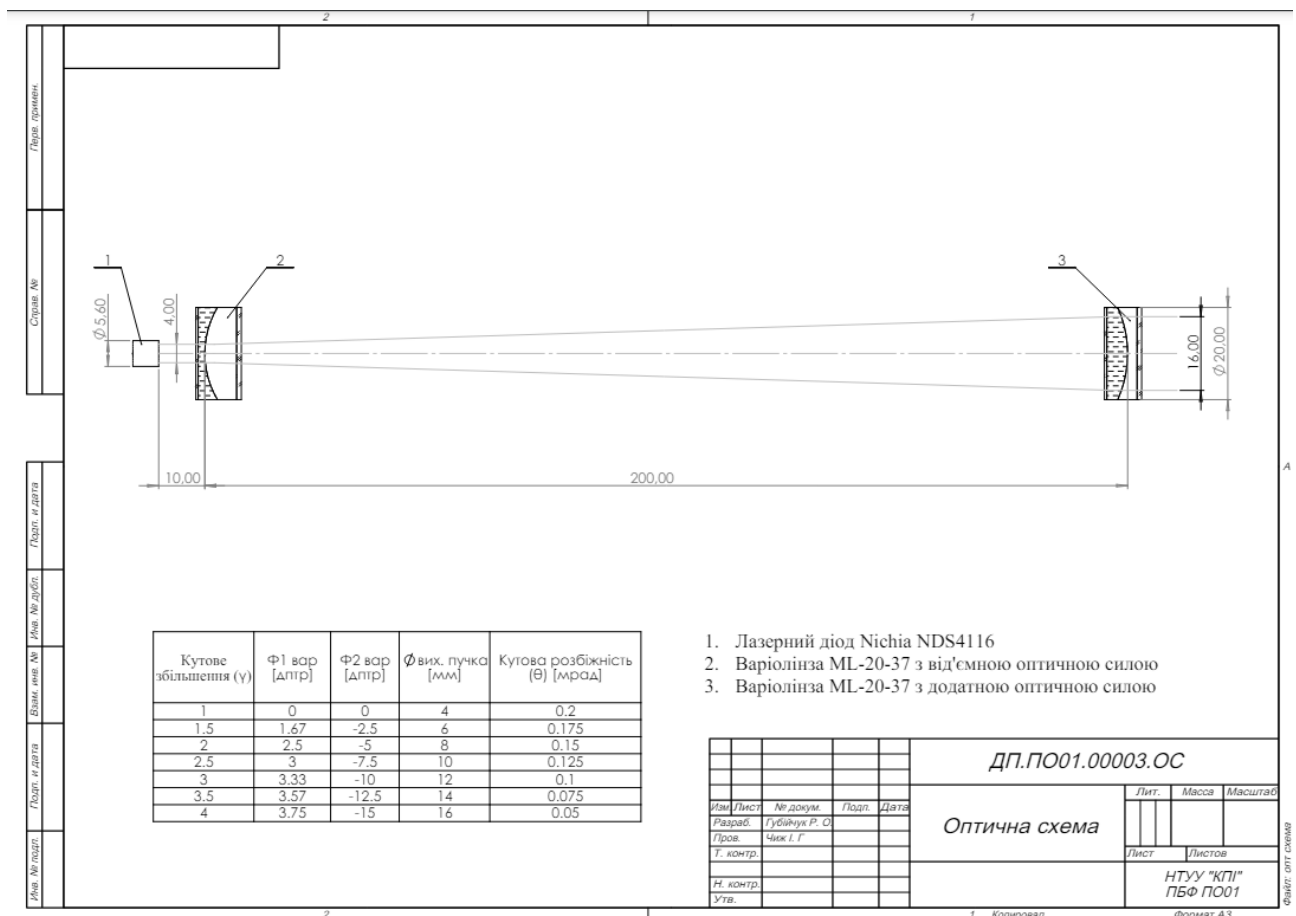


Рис 2.6 – Оптична схема розширювача лазерного променю

2.4 Розрахунок поля зору оптичної системи

Размер поля зрения систем Галилея определяется размерами виньетирующей диафрагмы, в роли которой выступает, как правило оправа первого компонента – первой варио-линзы. Если позади системы Галилея находится фикс-компонент, оправа которого служит апертурной (STOP), диафрагмой, то угловой размер поля зрения системы в пространстве ОР в радианах составляет:

В системі Галілея розмір поле зору визначається розмірами він'єтної діафрагми. Як правило у системі Галілея її роль виконує оправа першого компонента (першої варіолінзи). Якщо позаду системи Галілея розташовано фікс-компонент, оправа якого виконує роль апертурної діафрагми, то поле зору визначають за формулою (2.7)

Формули для розрахунків поля зору в афокальній системі Галілея наведено в [Чиж І. Г. Теорія оптичних систем]. За умовою технічного завдання потрібно розрахувати поле зору оптичної системи при відсутності він'єтування. У такому випадку поле зору розраховується за формулою:

$$2\omega[\text{рад}] = 2\text{arctg}\left(\frac{\phi_1 - \gamma\phi_{STOP}}{2\gamma(\gamma t' + L)}\right) \quad (2.6)$$

ϕ_1 – діаметр отвору першої варіолінзи ($\phi_1 = 20$ мм)

ϕ_{STOP} – діаметр пучка лазера ($\phi_{STOP} = 4$ мм)

$L = 200$ мм

t' – дистанція між першою варіолінзою та лазером ($t' = 10$ мм)

Розраховані значення поля зору використавши вираз 2.6 та занесемо розраховані значення до таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Поле зору системи при різних значеннях кутового збільшення

Кутове збільшення γ	2ω [рад]	$2\theta = \frac{2 * 10^{-3}}{\gamma}$
1	0.076	0.002
1.5	0.043	0.0013
2	0.027	0.001
2.5	0.018	0.0008
3	0.012	0.00066
3.5	0.007	0.00057
4	0.004	0.0005

З таблиці 2.4 видно, що для кожного значення кутового збільшення виконується умова $2\theta < 2\omega$, тобто під час розширення пучка лазера система не він'єтує пучок

2.5 Вибір та розрахунок механічних компонентів системи

Зміна оптичної сили варіолінзи відбувається за рахунок повороту зубчастого колеса варіолінзи. Одним з завдань даного дипломного проекту є забезпечення коректного функціонування описаної системи. Тому важливим етапом є механічний розрахунок елементів системи, які забезпечують її роботу.

Для побудови оптичної системи розширювача лазерного променя були використані такі механічні компоненти, як двигун та додаткове зубчасте колесо. Далі у роботі буде наведено розрахунки цих механічних компонентів та обґрунтування їх вибору.

Розрахунок кута повороту зубчастого колеса варіолінзи та вибір двигуна

Згідно технічного завдання розширення лазерного пучка має відбуватися плавно, тобто зміна оптичної сили лінз має змінюватись за деякий проміжок часу. Виходячи з цієї умови було складено таблицю 2.3, у якій наведені оптичні сили варіолінз при різних кутових збільшеннях. Отже буде доцільно у наступному кроці розрахувати зміну оптичної сили варіолінз на кожному етапі збільшення лазерного променя. Результат даного розрахунку наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Зміна оптичної сили варіолінз

Кутове збільшення (γ)	$\Delta\Phi_{1 \text{ вар}}$ [дптр]	$\Delta\Phi_{2 \text{ вар}}$ [дптр]
1 - 1.5	1,67	2,5
1.5 - 2	0,83	2,5
2 - 2.5	0,5	2,5
2.5 - 3	0,33	2,5
3 - 3.5	0,24	2,5
3.5 - 4	0,18	2,5

Згідно параметрів обраної варіолінзи зміна оптичної сили від -18 дптр до +18 дптр відбувається завдяки повороту зубчастого колеса на 20° . Виходячи з цього можна розрахувати, що:

$$20^\circ = 36 \text{ дптр,}$$

Звід

$$1^\circ = 1,8 \text{ дптр, або}$$

$$1 \text{ дптр} = 0, (5)^\circ$$

Отримавши залежності зміни оптичної сили від кута повороту зубчастого колеса, було проведено перерахунок значень оптичних сил з таблиці 2.5. У результаті перерахунку отримана таблиця 2.6, у якій наведенні значення зміни кутового збільшення системи та відповідний до них кут повороту зубчастого колеса варіолінзи.

Таблиця 2.6 - Зміни кута повороту зубчастого колеса

Кутове збільшення (γ)	$\Delta\alpha_{1 \text{ вар}}$ [град]	$\Delta\alpha_{2 \text{ вар}}$ [град]
1 - 1.5	0,928	1,389
1.5 - 2	0,461	1,389
2 - 2.5	0,278	1,389
2.5 - 3	0,183	1,389
3 - 3.5	0,133	1,389
3.5 - 4	0,100	1,389

$\Delta\alpha_{1 \text{ вар}}$ – зміна кута в гповороту зубчастого колеса додатної варіолінзи

$\Delta\alpha_{2 \text{ вар}}$ – зміна кута повороту зубчастого колеса від'ємної варіолінзи

Розрахувавши всі необхідні параметри варіолінз можна перейти до вибору двигуна. З огляду на те, що зміна оптичних сил варіолінз відбувається поетапно, то найкращим рішенням буде обрати кроковий двигун. Саме кроковий двигун зможе забезпечити безпосередній контроль за зміною значень кута повороту зубчастого колеса варіолінзи у такій оптичній системі. З таблиці 2.6 видно, що значення кутів повороту зубчастого колеса варіолінзи дуже малі, тому потрібно підібрати кроковий двигун, у якого кут повороту валу буде мінімальним. Для задоволення вище наведених потреб було обрано двигун SOYO NEMA14. Двигун зображений на Рис. 2.7, а його характеристики наведенні у таблиці 2.6.



Рис. 2.6 – Двигун SOYO NEMA14 [14]

Таблиця 2.7 – Характеристики двигуна

Розміри (мм)	Вага (г)	Діаметр валу (мм)	К-ть кроків на поворот валу
35 x 35 x 36	180	5	200

Перевагами даного двигуна є компактні розміри та малий кут повороту валу на крок, а саме $1.8^\circ/\text{крок}$. Наступні розрахунки будуть проведені опираючись на характеристики даного двигуна. Оскільки кут повороту валу двигуна все ще великий відносно кута повороту зубчастого колеса варіолінзи, то доцільно буде додати додаткове зубчасте колесо для кожної варіолінзи, яке забезпечить потрібний кут повороту.

Розрахунок зубчастого колеса для варіолінзи з від’ємною оптичною силою

Скориставшись технічними характеристиками варіолінзи ML-20-37 можна записати конструктивні параметри її зубчастого колеса:

- К-ть зубців = 127
- Модуль = 0.3
- Початковий діаметр = 38,1 мм

З таблиці 2.6 видно, що залежність зміни кута повороту зубчастого колеса для варіолінзи з від'ємною оптичною силою є лінійною. Тобто на всіх проміжках кут повороту однаковий і дорівнює значенню 1.389° . Оскільки вал двигуна за 1 крок повертається на 1.8° , а за розрахунками наведеними у таблиці вище потрібен поворот колеса на 1.389° , тому у систему потрібно додати зубчасте колесо та розрахувати його параметри так, щоб за 1 крок двигуна варіолінза змінювала свою оптичну силу на 2,5 дптр.

Розрахунок передатного числа:

$$u = \frac{z_1}{z_2} = \frac{\angle\beta}{\angle\alpha} \quad (2.7)$$

$\angle\alpha$ – кут повороту зубчастого колеса варіолінзи

$\angle\beta$ – кут повороту валу двигуна (другого зубчастого колеса)

z_1 – число зубців у зубчастого колеса варіолінзи

z_2 – число зубців у другого зубчастого колеса

Підставивши у вираз (2.7) відомі параметри варіолінзи можна виразити кількість зубців додаткового зубчастого колеса z_2 :

$$z_2 = \frac{z_1 * \Delta\alpha}{\angle\beta} = \frac{127 * 1,389^\circ}{1,8^\circ} = 98$$

Згідно розрахунків отримано колесо з такими конструктивними параметрами:

- К-ть зубців = 98
- Модуль = 0.3
- Початковий діаметр = 29,4 мм

У результаті після відпрацювання двигуном 1 кроку, додаткове зубчасте колесо буде обертатись на 1.8° , а за рахунок різниці зубців на колесах, зубчасте колесо варіолінзи буде повертатись на $1,389^\circ$ і відповідно оптична сила варіолінзи за 1 крок двигуна буде змінюватись на 2.5 дптр. Отже за 6 кроків двигун поверне

зубчасте колесо варіолінзи на $8. (3)^\circ$, тобто її оптична сила зміниться від 0 дптр до -15 дптр.

Розрахунок зубчастого колеса для варіолінзи з додатною оптичною силою

З таблиці 2.5 видно, що кут повороту зубчастого колеса першої варіолінзи, на відміну від другої, змінюється не лінійно. Згідно технічного завдання головним завданням оптичної системи є забезпечення плавного збільшення лазерного пучка від $\gamma = 1$ до $\gamma = 4$. Оскільки оптична система повинна забезпечити точне збільшення пучка тільки при значеннях кутового збільшення $\gamma = 1$ та $\gamma = 4$, тоді проміжними значеннями повороту зубчастого колеса можна знехтувати. Опираючись на це можна розрахувати середнє значення кута повороту зубчастого колеса для діапазону заданих значень. Таким чином взявши дані з таблиці 2.5 бачимо, що оптична сила додатної варіолінзи змінюється від 0 дптр до 3.75 дптр. З розрахунків зазначених вище $1^\circ = 1,8$ дптр, тому:

$$3,75 \text{ дптр} = 2,083^\circ$$

Кількість кроків двигуна для зміни оптичної сили додатної варіолінзи обираємо такою ж як і для від'ємної, а саме 6 кроків. Тому за один крок двигуна зубчасте колесо варіолінзи повернеться на кут $\Delta\alpha_{\text{сер}}$, де:

$$\Delta\alpha_{\text{сер}} = \frac{2,083^\circ}{6} = 0,347^\circ$$

Оскільки кут повороту валу двигуна за один крок складає 1.8° , тому потрібно додати додаткове зубчасте колесо та розрахувати його параметри за принципом зазначеним у попередньому пункті.

Розрахунок передатного числа як і в минулому випадку проведено використавши вираз (2.7). Підставивши відомі параметри у формулу можна виразити кількість зубців додаткового зубчастого колеса z_2 :

$$z_2 = \frac{z_1 * \Delta\alpha_{\text{сер}}}{\angle\beta} = \frac{127 * 0,347^\circ}{1,8^\circ} = 24$$

Згідно розрахунків отримано колесо з параметрами:

Модуль = 0.3

К-ть зубців = 24

Початковий діаметр = 7,2 мм

У результаті після відпрацювання двигуном 1 кроку, відбудеться зміна оптичної сили на 0,625 дптр.

2.6 Вибір елементів керування (драйвер і мікроконтролер) та написання коду програми для керування оптичною силою варіолінз

Для управління двигуном потрібно обрати драйвер, до якого буде підключено двигун, а система буде управлятися за допомогою мікроконтролера Arduino UNO R3 (Рис. 2.7). Найкращим варіантом, який буде задовольняти вимоги до функціонування системи є драйвер A4988. Зображення драйвера можна побачити на Рис. 2.8, а схему його підключення показано на Рис. 2.9. Даний драйвер має такі переваги, як простота підключення та зручне програмування. Завдяки цим перевагам, даний драйвер є ідеальним вибором для застосування у нашій системі.



Рис. 2.7 – Мікроконтролер Arduino UNO R3 [16]



Рис. 2.8 – Драйвер A4988 [15]

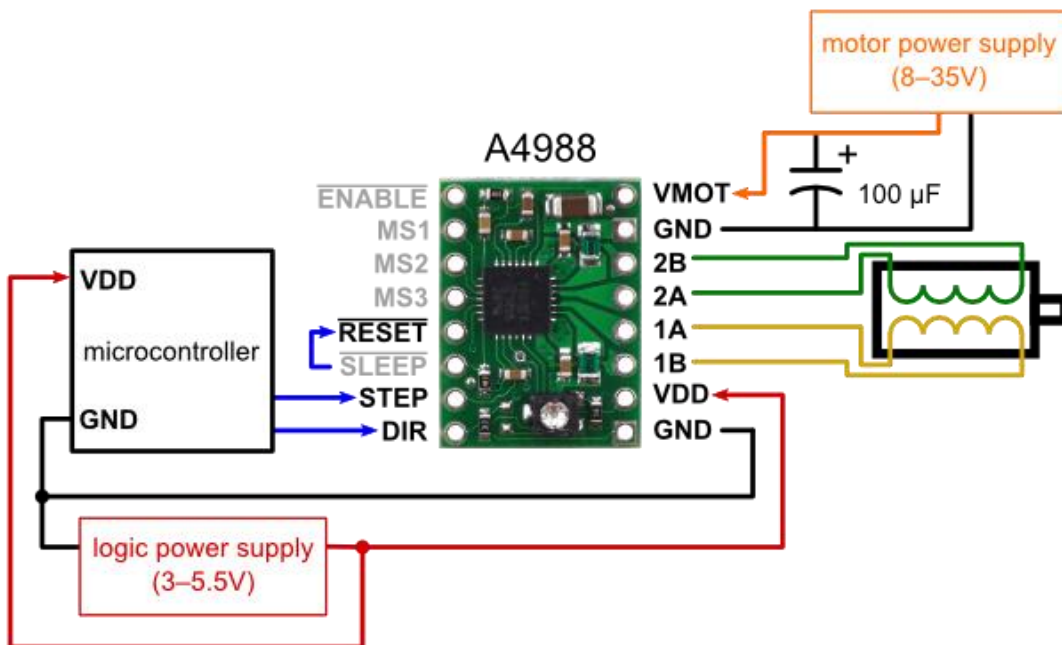


Рис. 2.9 – Схема підключення драйвера A4988

Останнім кроком для коректної роботи зібраної системи є написання коду драйвера, для управління двигуном. Оскільки двигун додатної варіолінзи повинен обертати зубчасте колесо за годинниковою стрілкою, а для від'ємної – проти годинникової, тому розглянемо код драйверів для двох випадків окремо. Код драйвера для управління варіолінзою з додатною оптичною силою наведений на Рис. 2.10, а для від'ємної варіолінзи на Рис. 2.11.

```

1 // Визначення контактних з'єднань і кроків двигуна на оберт
2 const int dirPin = 2;
3 const int stepPin = 3;
4 const int stepsPerRevolution = 6;
5 int stepDelay = 2000;
6
7 void setup () {
8     pinMode(stepPin, OUTPUT);
9     pinMode(dirPin, OUTPUT);
10 }
11
12 void loop() {
13     // Обертання валу двигуна за годинниковою стрілкою
14     digitalWrite(dirPin, HIGH);
15     // Обертання двигуна
16     for(int i=0; i<stepsPerRevolution; i++ ) {
17         digitalWrite(stepPin, HIGH);
18         delayMicroseconds(stepDelay);
19         digitalWrite(stepPin, LOW);
20         delayMicroseconds(stepDelay);
21     }
22     delay(1000);
23
24 }

```

Рис. 2.10 – Код драйвера для додатної варіолінзи

```

1 // Визначення контактних з'єднань і кроків двигуна на оберт
2 const int dirPin = 2;
3 const int stepPin = 3;
4 const int stepsPerRevolution = 6;
5 int stepDelay = 2000;
6
7 void setup () {
8     pinMode(stepPin, OUTPUT);
9     pinMode(dirPin, OUTPUT);
10 }
11
12 void loop() {
13     // Обертання валу двигуна проти годинниковою стрілкою
14     digitalWrite(dirPin, LOW);
15     // Обертання двигуна
16     for(int i=0; i<stepsPerRevolution; i++ ) {
17         digitalWrite(stepPin, HIGH);
18         delayMicroseconds(stepDelay);
19         digitalWrite(stepPin, LOW);
20         delayMicroseconds(stepDelay);
21     }
22     delay(1000);
23
24 }

```

Рис. 2.11 – Код драйвера для від'ємної варіолінзи

Провівши всі розрахунки оптичної системи та підібравши всі компоненти, які задовольняють технічне завдання, можна побудувати загальну функціональну схему приладу. Зображення функціональної схеми наведено на Рис. 2.12.

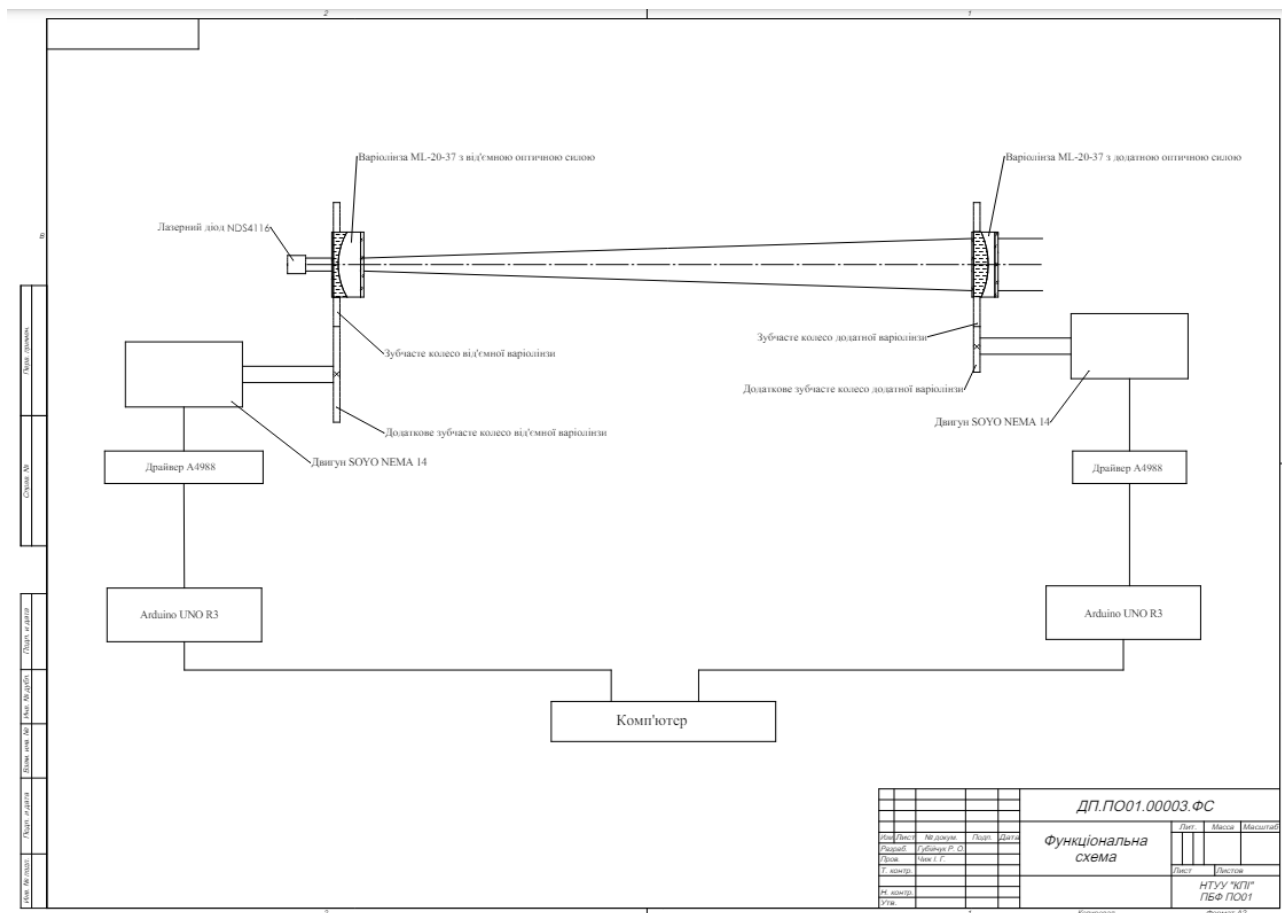


Рис. 2.12 – Функціональна схема розширювача лазерного променя

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі проведено огляд та аналіз технічних вимог до оптичної системи розширювача лазерного променя. Згідно вимог технічного завдання та вихідних даних до роботи було здійснено розрахунок параметрів варіо-лінз. Згідно результатів розрахунку було обрано варіо-лінзи, які задовольняють вимоги оптичної системи. У результаті було складено оптичну схему зум-афокальної системи з урахуванням розрахованих параметрів.

Відповідно до вимог роботи та параметрів оптичної системи було обрано додаткові механічні елементи системи. Такими компонентами у роботі є зубчасті колеса та двигун. Для всіх механічних елементів системи були проведені розрахунки їх параметрів. У підсумку механічні компоненти узгоджено з вимогами технічного завдання.

Крім того у цьому розділі проведено підбір керуючих елементів системи, такі як мікроконтролер та керуючий драйвер. У поєднанні з раніше обраними механічними компонентами вони забезпечують функціонування оптичної системи, дозволяючи керувати оптичними силами варіо-лінз.

Одним з заключних етапів другого розділу було написання коду програми для драйвера, що забезпечує коректну роботу розробленої оптичної системи.

У підсумку розроблено функціональну схему, на якій продемонстровано всі компоненти необхідні для функціонування розширювача лазерного променя. Функціональна схема зібрана у відповідності до вимог технічного завдання та розрахованих параметрів усіх компонентів оптичної системи.

РОЗДІЛ 3. АБЕРАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ЗУМ-АФОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Завдання розділу

У третьому розділі буде проведено дослідження розробленої зум-афокальної системи розширювача лазерного променя на наявність сферичних аберацій та проаналізовано вплив аберацій на функціональність системи. Згідно вимог технічного завдання потрібно провести дослідження сферичних аберацій при різних значеннях кутового збільшення, а саме при значеннях $\gamma = 1$, $\gamma = 2$ та $\gamma = 4$.

Завдання до третього розділу:

- Побудувати розроблену оптичну систему у середовищі ZEMAX
- Налаштувати оптичну систему відповідно до вимог технічного завдання
- Побудувати та дослідити графіки сферичних аберацій при різних значеннях кутового збільшення
- Зробити висновки згідно результатів дослідження сферичних аберацій

3.2 Дослідження сферичних аберацій зум-афокальної системи на варіо-лінзах при значенні кутового збільшення $\gamma = 1$

Surf.	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0 (unused)	Par 1 (unused)	Par 2 (unused)	Par 3 (unused)	P
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000	0.000					
1	Standard	Housing	Infinity	0.470		10.000	U	0.000				
2*	Standard	Cover Glass	Infinity	1.000	BK7	10.000	U	0.000				
3*	Standard		Infinity	4.176	E	10.000	U	0.000				
4*	Standard	Tunable Lens	-3.835E+004	3.133	E 1.38, 64.8	10.000	U	0.000				
5*	Standard	Cover Glass	Infinity	0.500	BK7	10.000	U	0.000				
6*	Standard		Infinity	3.921		10.000	U	0.000				
7	Standard	Housing	Infinity	0.000		10.000	U	0.000				
8*	Standard		Infinity	187.270		10.000	U	0.000				
9	Standard	Housing	Infinity	0.470		10.000	U	0.000				
10*	Standard	Cover Glass	Infinity	1.000	BK7	10.000	U	0.000				
11*	Standard		Infinity	4.176	E	10.000	U	0.000				
12*	Standard	Tunable Lens	-3.835E+004	3.133	E 1.38, 64.8	10.000	U	0.000				
13*	Standard	Cover Glass	Infinity	0.500	BK7	10.000	U	0.000				
14*	Standard		Infinity	3.921		10.000	U	0.000				
15	Standard	Housing	Infinity	0.000		10.000	U	0.000				
16*	Standard		Infinity	10.000		10.000	U	0.000				
17	Paraxial			3.438		10.000	U		3.438	1		
18	Standard		Infinity	8.383E-007		9.738E-007	0.000					
IMA	Standard		Infinity	-		10.000	U	0.000				

Рис. 3.1 – Параметри оптичної системи при $\gamma = 1$

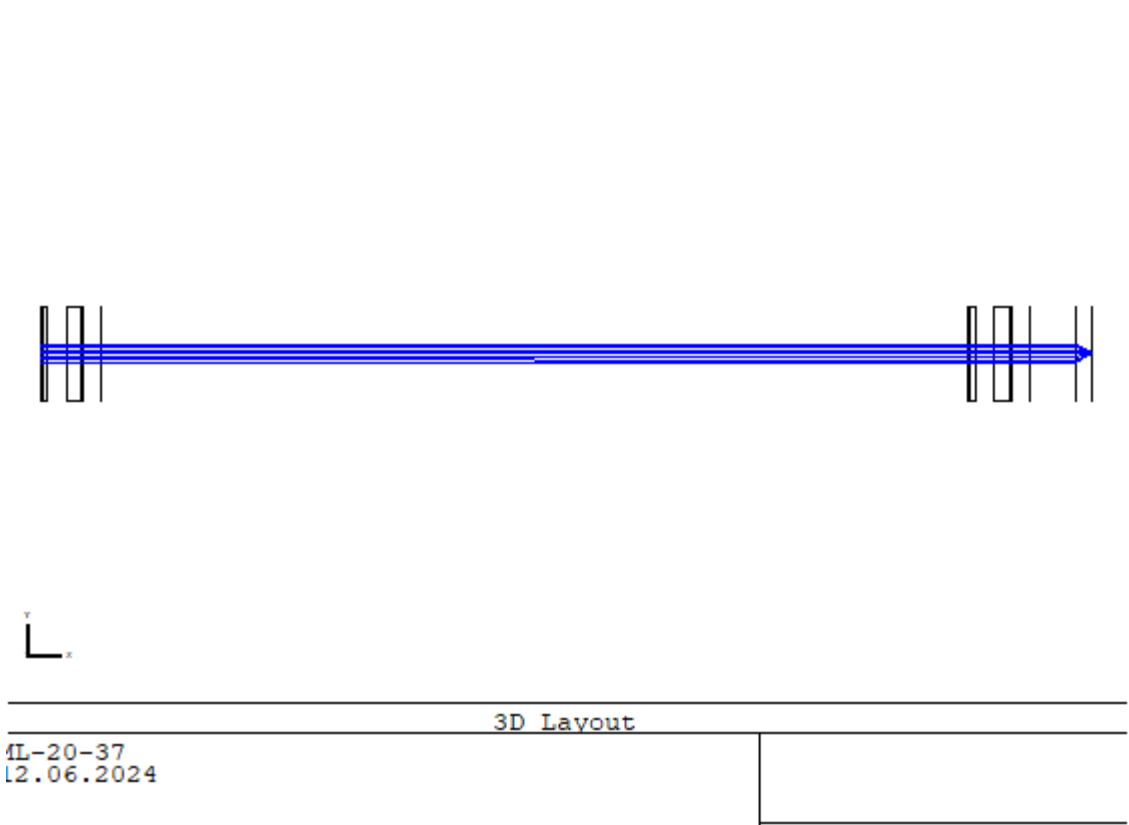


Рис. 3.2 – Зображення ходу променів в оптичній системі при $\gamma = 1$

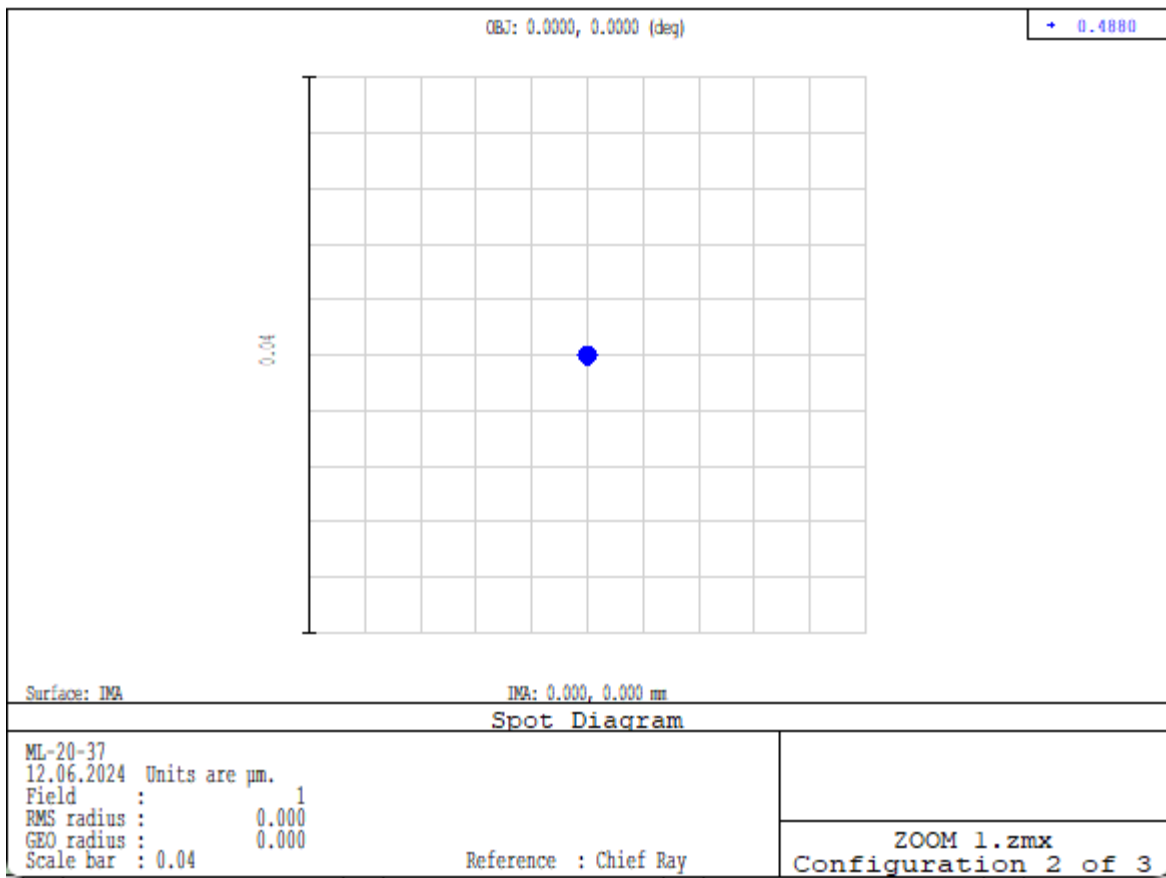


Рис. 3.3 – Графік сферичних абераций оптичної системи при $\gamma = 1$

Проаналізувавши графік аберацій на Рис. 3.3 видно, що кутова розбіжність променів рівна нулю, отже система не створює сферичної аберації.

3.3 Дослідження сферичних аберацій зум-афокальної системи на варіо-лінзах при значенні кутового збільшення $\gamma = 2$

Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0 (unused)	Par 1 (unused)	Par 2 (unused)	Par 3 (unused)	P
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000	0.000					
1	Standard	Housing	Infinity		0.470						
2*	Standard	Cover Glass	Infinity		1.000	BK7	10.000	U	0.000		
3*	Standard	Cover Glass	Infinity		4.830	E	10.000	U	0.000		
4*	Standard	Tunable Lens	-76.710		3.532	E	1.38, 64.8	U	0.000		
5*	Standard	Cover Glass	Infinity		0.500	BK7	10.000	U	0.000		
6*	Standard	Cover Glass	Infinity		2.868		10.000	U	0.000		
7	Standard	Housing	Infinity		0.000		10.000	U	0.000		
8*	Standard	Cover Glass	Infinity		188.177	V	10.000	U	0.000		
9	Standard	Housing	Infinity		0.470		10.000	U	0.000		
10*	Standard	Cover Glass	Infinity		1.000	BK7	10.000	U	0.000		
11*	Standard	Cover Glass	Infinity		3.849	E	10.000	U	0.000		
*	Standard	Tunable Lens	153.414		3.460	E	1.38, 64.8	U	0.000		
13*	Standard	Cover Glass	Infinity		0.500	BK7	10.000	U	0.000		
14*	Standard	Cover Glass	Infinity		3.921		10.000	U	0.000		
15	Standard	Housing	Infinity		0.000		10.000	U	0.000		
16*	Standard	Cover Glass	Infinity		10.000		10.000	U	0.000		
17	Paraxial				3.438				3.438	1	
18	Standard		Infinity		-3.413E-005		4.559E-005	0.000			
IMA	Standard		Infinity		-		6.329E-006	0.000			

Рис. 3.4 – Параметри оптичної системи при $\gamma = 2$

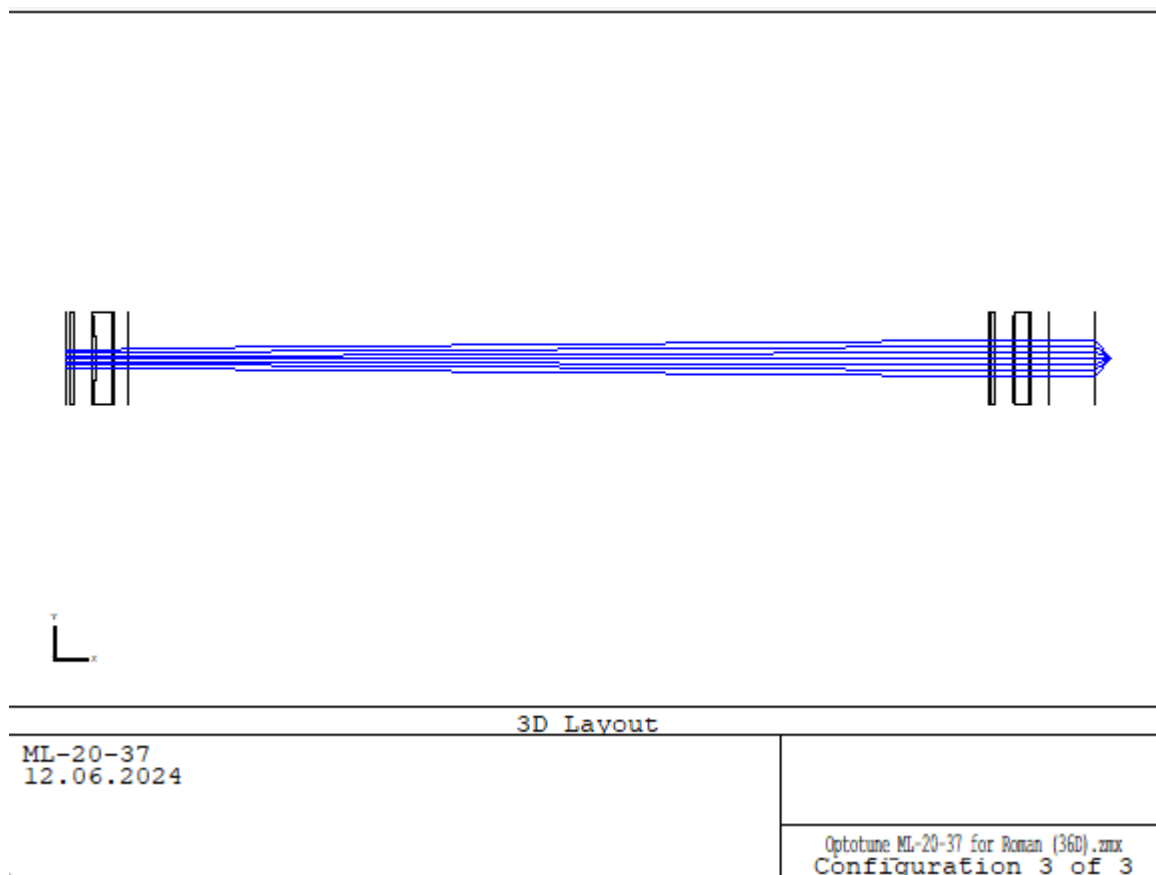


Рис. 3.5 – Зображення ходу променів в оптичній системі при $\gamma = 2$

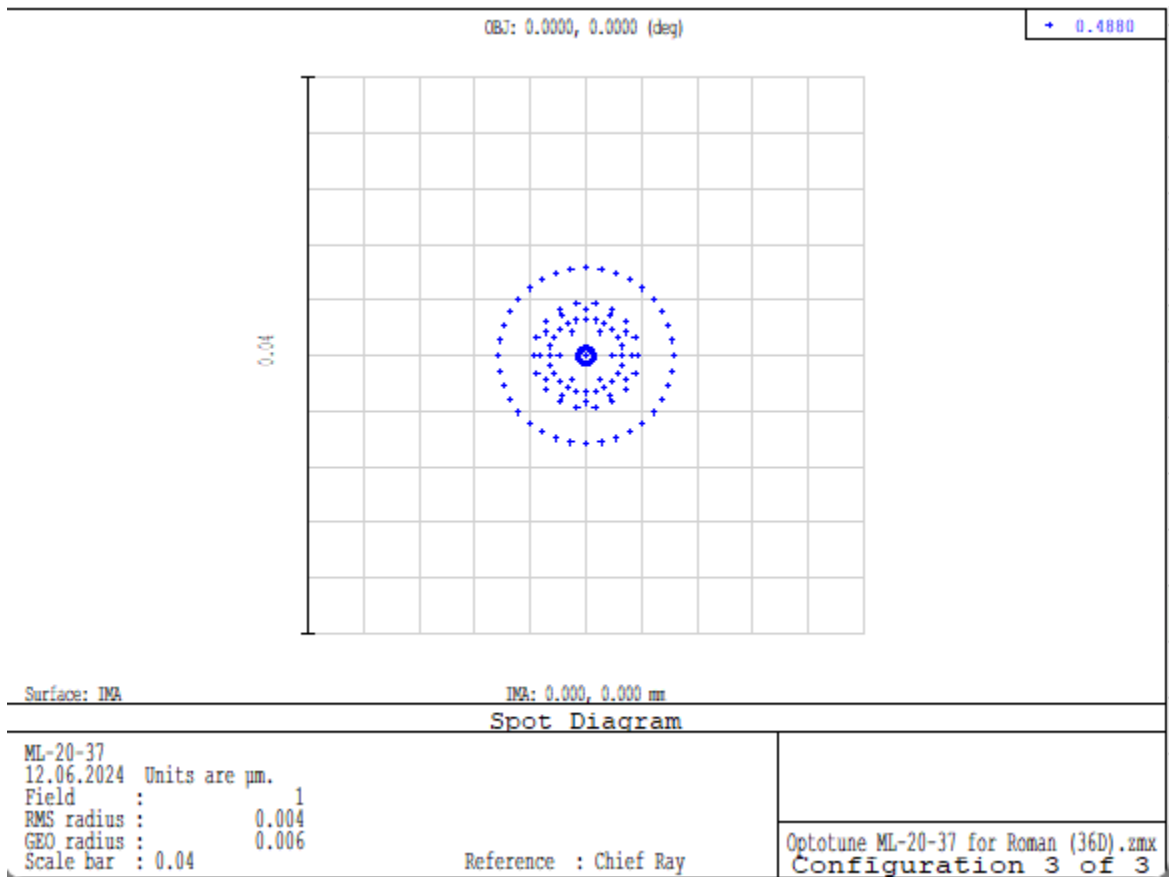


Рис. 3.6 – Графік сферичних аберацій оптичної системи при $\gamma = 2$

З графіку сферичних аберацій зображеному на Рис. 3.6 можна побачити, що на виході з системи значення кутової розбіжності дорівнює $0.006'$. Таке значення кутової розбіжності є не значним, воно свідчить про присутність невеликої сферичної аберації у системі.

3.4 Дослідження сферичних аберацій зум-афокальної системи на варіо-лінзах при значенні кутового збільшення $\gamma = 4$

Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0 (unused)	Par 1 (unused)	Par 2 (unused)	Par 3 (unused)	P
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000	0.000					
1	Standard	Housing	Infinity	0.470		10.000	U	0.000				
2*	Standard	Cover Glass	Infinity	1.000	BK7	10.000	U	0.000				
3*	Standard		Infinity	6.197	E	10.000	U	0.000				
4*	Standard	Tunable Lens	-25.740	2.165	E 1.38, 64.8	10.000	U	0.000				
5*	Standard	Cover Glass	Infinity	0.500	BK7	10.000	U	0.000				
6*	Standard		Infinity	2.868		10.000	U	0.000				
7	Standard	Housing	Infinity	0.000		10.000	U	0.000				
8*	Standard		Infinity	192.177	V	10.000	U	0.000				
9	Standard	Housing	Infinity	0.470		10.000	U	0.000				
10*	Standard	Cover Glass	Infinity	1.000	BK7	10.000	U	0.000				
11*	Standard		Infinity	3.688	E	10.000	U	0.000				
*	Standard	Tunable Lens	102.990	3.621	E 1.38, 64.8	10.000	U	0.000				
13*	Standard	Cover Glass	Infinity	0.500	BK7	10.000	U	0.000				
14*	Standard		Infinity	3.921		10.000	U	0.000				
15	Standard	Housing	Infinity	0.000		10.000	U	0.000				
16*	Standard		Infinity	10.000		10.000	U	0.000				
17	Paraxial			3.438		10.000	U		3.438	1		
18	Standard		Infinity	-4.468E-004		1.220E-003		0.000				
IMA	Standard		Infinity	-		1.831E-004		0.000				

Рис. 3.7 – Параметри оптичної системи при $\gamma = 4$

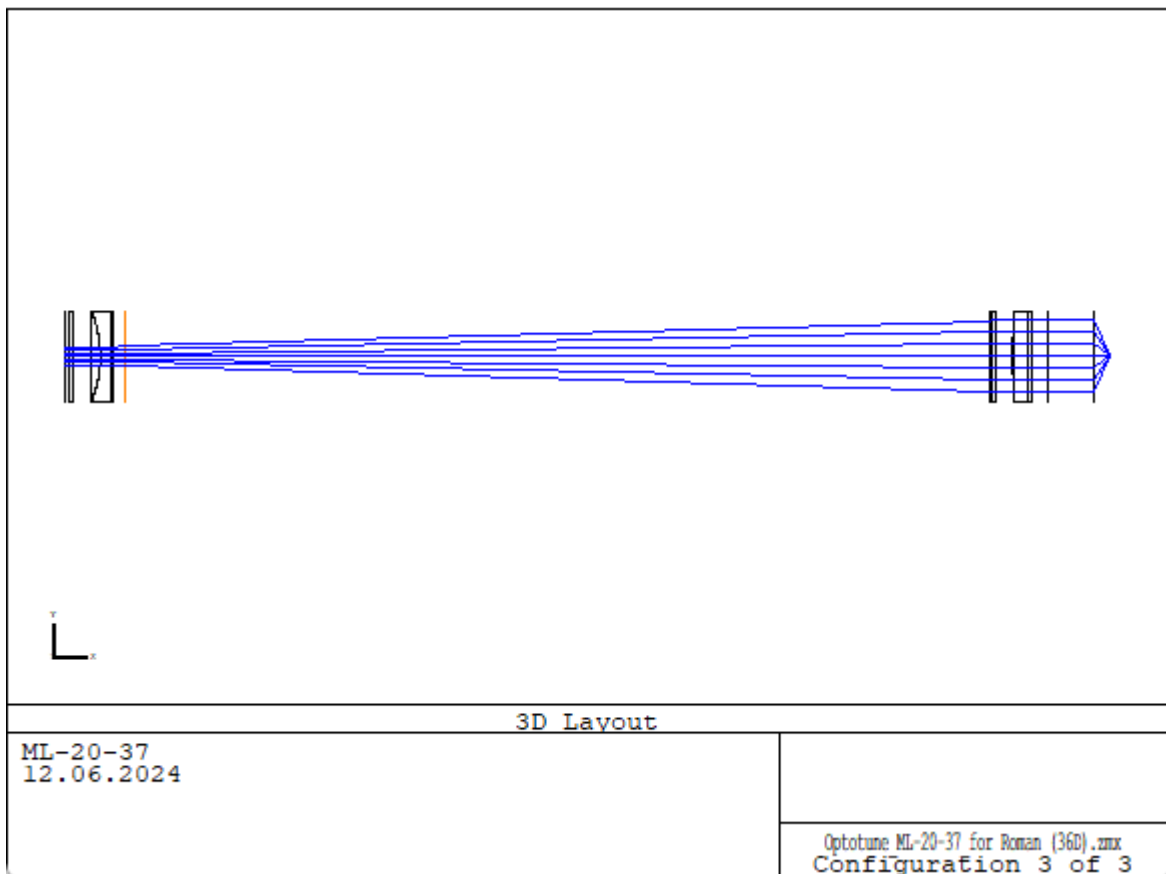


Рис. 3.8 – Зображення ходу променів в оптичній системі при $\gamma = 4$

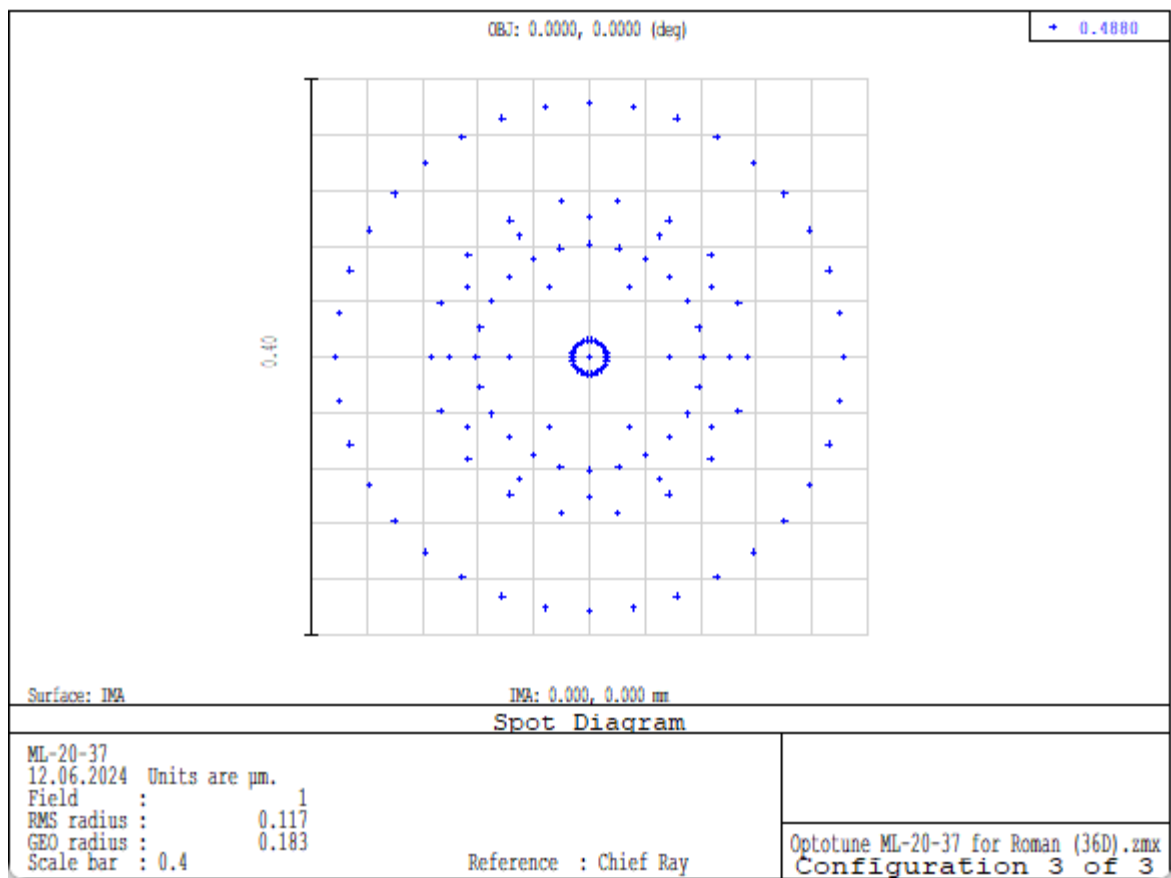


Рис. 3.9 – Графік сферичних абераций оптичної системи при $\gamma = 4$

З графіку зображеного на Рис. 3.9 можна побачити, що значення кутової розбіжності становить $0.183'$. За вимогами технічного завдання при значенні кутового збільшення $\gamma = 4$ кутова розбіжність повинна мати значення 0.05 мрад.

Представимо отримане значення кутової розбіжності у мрад:

$$\theta|_{\gamma=4} = 0.183 * 2 * \frac{\pi}{180 * 60} = 0.11 \text{ мрад}$$

Отримане значення кутової розбіжності перевищує очікуване значення більше чим у 2 рази. Це сигналізує про те, що в оптичній системі присутня сферична аберація, яка не дозволяє в повній мірі задовольнити вимоги технічного завдання. Порівнявши результати досліджень сферичних аберацій при різних значеннях кутового збільшення можна зробити висновок, що сферична аберація стає посилюється в залежності від радіусів кривизни варіо-лінз. Тобто чим більш опуклою (або увігнутою) є мембрана варіо-лінзи, тим сильніше проявляється сферична аберація. Отже система в подальшому потребує проведення додаткових досліджень та модифікації, щоб зменшити значення аберації.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Під час написання третього розділу було відтворено оптичну систему та проведено для неї дослідження аберацій у середовищі ZEMAX. Відповідно до поставленого завдання дослідження проводились при різних значеннях кутового збільшення системи, щоб повною мірою оцінити сферичні аберації, які виникають у системі, дослідити їх вплив на функціонування системи та виявити залежності їх виникнення. Поставлене завдання вдалось виконати у повній мірі. На основі проведених досліджень вдалося виявити наступні напрямки подальшого вдосконалення зум-афокальної системи.

Так аналіз сферичної аберації при різних значеннях кутового збільшення показав, що аберація в досліджуваній оптичній системі посилюється зі збільшенням значення кутового збільшення через зменшення радіусів кривизни мембран варіо-лінз. Тобто ріст оптичної сили варіо-лінзи супроводжується ростом сферичної аберації.

На основі цього можна зробити висновок, що система в подальшому потребує модернізації, яка зменшує цей недолік. Така тема може бути напрямком наступних робіт.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Під час написання дипломної роботи мною було досліджено зум-афокальну систему на варіо-лінзах, яка в даній роботі була представлена у вигляді розширювача лазерного променя. Завдяки особливим властивостям змінного фокусу варіо-лінз вдалось побудувати оптичну систему з нерухомими

компонентами згідно Завдання та проведено дослідження її функціональності , здійснено оцінку якості такої системи.

У ході виконання роботи було проведено огляд загальних теоретичних відомостей про зум-афокальні системи та варіо-лінзи, досліджено особливості будови та їх головні характеристики. Аналіз теоретичних даних допоміг коректно розрахувати параметри компонентів, які були використані при розробці оптичної системи та здійснити вибір таких компонентів, які задовольняють вимоги технічного завдання. Також у роботі було розроблено та представлено програмне забезпечення, яке дозволяє керувати кутовим збільшенням зум-афокальної оптичної системи. Результатом є створення нової оптичної системи, яка відповідає вимогам Завдання на дипломну роботу.

Використані джерела

1. Чиж, І. Г. “Теорія оптичних систем”, 2021. - 426 с.
2. Hongwen Ren, Shin-Tson Wu “Introduction to Adaptive Lenses”, 2012 – 286 с.
3. https://www.rp-photonics.com/afocal_optical_systems.html
4. <https://www.globalspec.com/reference/73835/203279/2-3-afocal-systems-general>
5. https://www.spiedigitallibrary.org/ebooks/FG/Field-Guide-to-Geometrical-Optics/18/Afocal-Systems/10.1117/3.547461.p18#_
6. <https://www.britannica.com/science/optics/Optics-and-information-theory>
7. <https://www.optotune.com/focus-tunable-lenses>
8. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/liquid-lenses-in-imaging/>
9. https://www.qioptiq-shop.com/out/Graphics/en/Pic6/00102049_0.pdf
10. <https://www.edmundoptics.com/f/corning-varioptic-variable-focus-liquid-lenses/15042/>
11. <https://www.corning.com/worldwide/en/products/advanced-optics/product-materials/corning-varioptic-lenses/variable-focus-lenses-a-series.html>
12. <https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/ld/NDS4116.pdf>
13. <https://www.optotune.com/ml-20-37-lens>
14. <https://arduino.ua/prod531-shagovii-dvigatel-soyo-nema14-sy35st36-1004a-2-7v-ot-pololu>
15. <https://arduino.ua/prod551-draiver-shagovogo-dvigatelya-a4988-ot-pololu>
16. https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=60&product_id=25&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwpZWzBhC0ARIsACvjWRP7IjRnhxqcUfZODbNvvMHtLKKAQ0WrVGwucdBGLGWU2aoKz2M5uuQaArNoEALw_wcB