

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

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

«На правах рукопису»
УДК 535.311

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ
(підпис)

«__» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

**«Комп'ютерно-інтегровані технології та системи в приладобудуванні»
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»**

**на тему: «Комп'ютерно-інтегрований трансфокатор з нерухомими оптичними
компонентами»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПГ-41мп
Губійчук Роман Олександрович

(підпис)

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Чиж Ігор Генріхович

(підпис)

Консультант з розроблення стартап-проекту:

д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояринова Катерина Олександрівна

(підпис)

Рецензент:

Професор, доктор технічних наук
Тимчик Григорій Семенович

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Надія Бурау
«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента
Губійчука Романа Олександровича

1. Тема дисертації : «Комп'ютерно-інтегрований трансфокатор з нерухомими оптичними компонентами», науковий керівник дисертації Чиж Ігор Генріхович, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації 15 грудня 2025 р.

3. Об'єкт дослідження: Вплив зміни оптичної сили варіолінз на положення їх головних точок, площин.

4. Предмет дослідження: Оптична система трансфокатора із зум-афокальною системою на нерухомих комп'ютерно- інтегрованих варіолінзах.

Вихідні дані до розробки оптичної системи трансфокатора:

1.3 Фікс-об'єktiv трансфокатора – дволінзова склейка з фокусною відстанню 25мм.

4.2 Діапазон зміни фокусної відстані трансфокатора чотирикратне (37.5– 100) мм.

4.4 В афокальній системі трансфокатора використати варіолінзи фірми Optotune, ML-20-37

5. Перелік завдань

До розділу 1

5.1 Огляд стану розвитку в галузі електрично керованих варіолінз для оптичних зум-систем, принципи їх дії, оптичні системи,

функціональні параметри відомих моделей варіолінз.

До розділу 2

5.2 Дослідження зміни положення вздовж оптичної осі головних точок моделей варіолінз фірм Corning® та Optotune у повному робочому діапазоні зміни їх оптичних сил.

До розділу 3

5.3 Моделювання афокальної системи галілеєвського типу для заданого трансфокатора з урахуванням виявлених рухів головних точок.

5.4 Розробка стартап проекту до виробництва трансфокатора.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

1. Ілюстративний матеріал до огляду електрично керованих варіолінз.
2. Графіки і апроксимації отриманих залежностей положення головних точок варіолінз від їх оптичних сил.
3. Методика розрахунків оптичних сил оптичних сил варіолінз трансфокатора з урахуванням рухів головних точок.
4. Функціональна схема трансфокатора
5. Оптична схема трансфокатора.

7. Орієнтовна публікація: Губійчук Р.О. Дослідження руху кардинальних точок в комп'ютерно інтегрованих варіолінзах на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні” грудень 2025р.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап проекту	Бояринова К.О., завідувачка кафедри економічної кібернетики		

10. Дата видачі завдання 06 жовтня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва пунктів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	5. 1	27.10.25	
2	5. 2	08.11.25	
3	5. 3	15.11.25	
4	5. 4	07 .12.25	
5.	Графічний матеріал до презентації	18 .12.25	
6	Попередній захист дисертації	12. 12. 25	

Студент _____

Роман Губійчук

Керівник _____

Ігор Чиж

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 102 ст., 58 рис., 38 табл., 24 джерел.

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІЙ ТРАНСФОКАТОР З НЕРУХОМИМИ ОПТИЧНИМИ КОМПОНЕНТАМИ

Задачею даної дисертації є створення та дослідження оптичної системи трансфокатора на базі нерухомих компонентів, що забезпечує чотирикратну зміну масштабу зображення. Актуальність роботи обумовлена потребою сучасної оптико-електронної промисловості у швидкодіючих та компактних системах змінного збільшення без інерційних механічних вузлів.

У роботі проведено аналіз існуючих рішень та обґрунтовано вибір побудови зум-системи на основі афокальної насадки галілеївського типу з використанням рідинних лінз Optotune ML-20-30. Ключовим етапом дослідження стало вивчення впливу зміни оптичної сили варіолінз на зміщення їх головних точок вздовж оптичної осі. Встановлено, що ігнорування цього явища призводить до недопустимого дефокусування зображення, тому розроблено методику синтезу оптичної зум-системи з урахуванням виявлених залежностей.

Основним результатом є виявлені залежності рухів кардинальних точок в комерційних моделях варіолінз, та оптична система трансфокатора з діапазоном фокусних відстаней 37.5–100 мм, яка забезпечує відсутність дефокусування зображення.

Ключові слова: рух кардинальних точок варіолінз, афокальна система Галілея на варіолінзах, трансфокатор.

ABSTRACT

Explanatory note: 102 pages, 58 figures, 38 tables, 24 sources.

COMPUTER-INTEGRATED TRANSFOCATOR WITH FIXED OPTICAL COMPONENTS

The aim of this dissertation is to create and study an optical zoom system based on fixed components that provides a fourfold change in image scale. The relevance of this work is due to the need of the modern optoelectronic industry for fast and compact variable magnification systems without inertial mechanical components.

The work analyzes existing solutions and justifies the choice of a zoom system based on an afocal Galilean-type attachment using Optotune ML-20-30 liquid lenses. A key stage of the research was the study of the effect of changes in the optical power of vario lenses on the displacement of their principal points along the optical axis. It has been established that ignoring this phenomenon leads to unacceptable defocusing of the image, therefore, a method for synthesizing an optical zoom system has been developed, taking into account the identified dependencies.

The main result is the identified dependencies of the movements of cardinal points in commercial models of vario lenses, and an optical system of a zoom lens with a focal length range of 37.5–100 mm, which ensures the absence of image defocusing.

Keywords: movement of cardinal points of vario lenses, Galilean afocal system on vario lenses, transfocator.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ РОЗВИТКУ В ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНИХ ВАРІОЛІНЗ ДЛЯ ОПТИЧНИХ ЗУМ-СИСТЕМ, ПРИНЦИПИ ЇХ ДІЇ, ОПТИЧНІ СИСТЕМИ, ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ ВАРІОЛІНЗ	10
1.1 Переваги використання варіолінз над панкратичними об’єктивами.....	10
1.1.1 Порівняльна характеристика панкратичних об’єктивів і варіолінз.....	11
1.1.2 Перспективи заміни зум-об’єктивів варіолінзами.....	12
1.2 Типи варіолінз	13
1.2.1 Функціональні параметри та принцип роботи варіолінз	15
1.3 Тенденції розвитку варіолінз	28
1.4 Трансфокатори	29
1.4.1 Будова та принцип дії	29
1.4.2 Еволюція конструкції афокального блоку	31
1.4.3 Сфери застосування	32
Висновки до розділу:.....	33
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ПОЛОЖЕННЯ ВЗДОВЖ ОПТИЧНОЇ ОСІ ГОЛОВНИХ ТОЧОК КОМЕРЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ВАРІОЛІНЗ ФІРМ ORTOTUNE ТА CORNING®VARIOPTIC®	34
2.1 Задачі та мета досліджень.....	34
2.2 Метод досліджень.....	34
2.3. Методика досліджень.....	36
2.4 Результати досліджень.....	36
Висновки до розділу.....	48
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ТРАНСФОКАТОРА З ЗУМ- АФОКАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ ГАЛІЛЕЯ ПОБУДОВАНОЇ НА НЕРУХОМИХ ВАРІОЛІНЗАХ	50

3.1 Мета та завдання розділу.....	50
3.2 Метод комп'ютерного моделювання трансфокатора	50
3.2.1 Розрахунки значень оптичних сил варіо-компонентів системи Галілея залежних від кутового збільшення афокальної системи з урахуванням осьових зсувів головних точок варіо-компонентів	51
3.2.2 Розрахунки діаметрів спот-діаграм зображення осьової точки, сформованих трансфокатором без урахування зсувів головних точок варіолінз	55
3.2.3 Розрахунки діаметрів спот-діаграм зображення осьової точки, сформованих трансфокатором з урахуванням зсувів головних точок варіолінз	59
Висновки до розділу.....	61
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІЙ ТРАНСФОКАТОР НА ВАРІОЛІНЗАХ»	62
4.1 Опис технології та технологічний аудит ідеї проєкту.....	62
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	68
4.3. Розроблення ринкової стратегії проєкту.....	79
4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	84
4.5. Бізнес-модель та реалізація стартап-проєкту	90
ВИСНОВКИ.....	100
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА	101

ВСТУП

Актуальність обраної теми. У сучасній оптотехніці, зокрема в системах машинного зору, робототехніці та БПЛА, критично важливим є зменшення масогабаритних показників та підвищення швидкодії оптичних приладів. Класичні трансфокатори (зум-об'єктиви) мають суттєвий недолік — наявність складних механічних вузлів для переміщення лінз, що обмежує швидкість зміни масштабу, знижує надійність системи та робить її вразливою до вібрацій. Вирішенням цієї проблеми є використання адаптивних оптичних елементів — варіолінз, які дозволяють змінювати оптичну силу без механічного руху. Однак, проектування таких систем ускладнюється тим, що при зміні кривизни поверхонь рідинних лінз відбувається нелінійний зсув їхніх головних точок, що часто ігнорується у простих розрахунках, але є критичним для якості зображення. Тому створення методики проектування трансфокаторів з урахуванням цих параметрів є актуальним науково-технічним завданням.

Мета роботи: створення та дослідження комп'ютерно-інтегрованого трансфокатора з нерухомими оптичними компонентами на базі афокальної системи галілеївського типу, який забезпечує задану зміну масштабу зображення без появи дефокусування зображення.

Завдання дослідження:

- Огляд стану розвитку галузі електрично керованих варіолінз та аналіз їх функціональних параметрів.
- Дослідження зміни положення вздовж оптичної осі головних точок моделей варіолінз (зокрема Optotune та Corning) у повному робочому діапазоні зміни їх оптичних сил.
- Моделювання афокальної системи галілеївського типу для заданого трансфокатора з урахуванням виявлених рухів головних точок.
- Розробка стартап-проекту до виробництва досліджуваного трансфокатора.

Об'єктом дослідження є вплив зміни оптичної сили варіолінз на положення їх кардинальних (головних і вузлових) точок та площин.

Предметом дослідження є оптична система трансфокатора із зум-афокальною системою на нерухомих комп'ютерно-інтегрованих варіолінзах, що відповідає вимогам завдання.

Методи дослідження: використання методів теорії оптичних систем, методи апроксимації функцій що описують рухи кардинальних точок, комп'ютерне моделювання оптичних систем з абераційним аналізом зображень.

Наукова новизна полягає у виявленні закономірності рухів кардинальних точок оптичної системи варіолінз, та обґрунтуванні на цій основі методики габаритного розрахунку афокальної системи для трансфокаторів, побудованої на варіолінзах, яка забезпечує при цих рухах стабільне положення зображення, сформоване трансфокатором, при змінах кутового збільшення афокальної системи.

Публікації. Губійчук Р.О., студент гр. ПГ-41мп, д.т.н., проф. Чиж І.Г КПІ ім. Ігоря Сікорського. Дослідження руху кардинальних точок в комп'ютерно інтегрованих варіолінзах // Збірник праць XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 10-11 грудня 2025р. — К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 2025.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ РОЗВИТКУ В ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРИЧНО КЕРОВАНИХ ВАРІОЛІНЗ ДЛЯ ОПТИЧНИХ ЗУМ-СИСТЕМ, ПРИНЦИПИ ЇХ ДІЇ, ОПТИЧНІ СИСТЕМИ, ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ ВАРІОЛІНЗ

1.1 Переваги використання варіолінз над панкратичними об'єктивами

У сучасній оптиці дедалі більшої актуальності набувають змінно фокусні елементи, які забезпечують регулювання масштабу зображення та глибини фокусування без переміщення всієї системи відносно об'єкта. Традиційним рішенням цього завдання тривалий час залишалися панкратичні (зум-) об'єктиви, що базуються на механічному переміщенні групи лінз. Проте розвиток портативної електроніки, біомедичних технологій та систем технічного зору висунув нові вимоги до мініатюризації, енергоефективності та швидкодії оптичних систем, які традиційна механіка задовольнити не може [1].

Панкратичні об'єктиви відзначаються складною конструкцією, що включає кілька рухомих оптичних елементів і високоточні механічні вузли для їх синхронізованого переміщення. Це неминує збільшує масу й габарити пристрою, ускладнює виробництво та підвищує собівартість. Крім того, наявність рухомих частин знижує надійність у тривалому використанні й обмежує швидкість зміни фокусної відстані, що є критично важливим у високошвидкісних системах візуалізації [2].

На відміну від цього, варіолінзи реалізують зміну фокусної відстані завдяки керованій зміні власних фізичних характеристик — кривизни поверхні, розподілу показника заломлення чи геометрії оптичного елемента. Такий підхід дозволяє відмовитися від складних механічних компонентів, що істотно зменшує розміри й вагу системи. Варіолінзи відзначаються високою швидкістю реагування на зовнішні стимули (електричне поле, тиск, деформацію мембрани тощо), що робить їх придатними для інтеграції в мобільні пристрої, окуляри віртуальної та доповненої реальності, медичне обладнання та системи машинного зору.

Таким чином, поява варіолінз обумовлена об'єктивними потребами сучасної науки й техніки у створенні компактних, надійних і високошвидкісних

зміннофокусних оптичних елементів, які усувають обмеження класичних панкратичних об'єктивів [1, 2].

1.1.1 Порівняльна характеристика панкратичних об'єктивів і варіолінз

Панкратичні (зум-) об'єктиви і варіолінзи вирішують однакове завдання — забезпечення змінної фокусної відстані. Однак принципи реалізації в них принципово різні. Панкратичні об'єктиви ґрунтуються на механічному переміщенні декількох оптичних елементів, тоді як варіолінзи змінюють фокус завдяки модифікації фізичних властивостей одного оптичного елемента. Це визначає як переваги, так і обмеження кожного підходу [3].

Щоб наочно продемонструвати різницю між варіолінзами та панкратичними об'єктивами розглянемо дані табл. 1.1.

Таблиця 1.1 Порівняльна характеристика панкратичних об'єктивів та варіолінз

Критерій	Панкратичні об'єктиви	Варіолінзи
Конструкція	Набір оптичних елементів з механічними приводами	Єдиний оптичний елемент з керованою геометрією чи показником заломлення
Принцип роботи	Зміна фокусу шляхом переміщення груп лінз	Зміна кривизни поверхні або оптичних властивостей під дією зовнішнього стимулу
Габарити та маса	Великі, громіздкі, з багатьма деталями	Компактні, легкі, придатні для мініатюризації
Швидкодія	Обмежена інерційністю механіки	Висока, майже миттєва реакція на керування
Надійність	Знижується через рухомі частини та зношення механіки	Вища, оскільки немає механічних вузлів
Виробництво	Вимагає точних механічних систем, складне та дороге	Спрощене, перспективне для масового виробництва
Якість зображення	Висока, добре відпрацьовані технології	Може обмежуватись діапазоном змін та оптичними аберациями
Застосування	Професійна фототехніка, відеокамери, оптика з високими вимогами до якості	Мобільні пристрої, AR/VR-окуляри, медичні прилади, системи машинного зору

1.1.2 Перспективи заміни зум-об'єктивів варіолінзами

Варіолінзи мають значний потенціал для заміни традиційних панкратичних об'єктивів у тих сферах, де критичною є мініатюризація, швидкодія та енергоефективність. Їх компактність, відсутність складної механіки та можливість електронного керування роблять їх привабливими для мобільних пристроїв, систем віртуальної та доповненої реальності, медичного обладнання й автоматизованих систем технічного зору. У цих галузях поступовий перехід від громіздких механічних об'єктивів до варіолінз є реалістичним у найближчій перспективі [4].

Разом з тим, повна заміна зум-об'єктивів наразі неможлива через низку обмежень. Технології варіолінз поки що поступаються класичним системам у діапазоні зміни фокусної відстані, рівні оптичних аберацій та якості зображення. Для професійної фототехніки й кінематографії, де ключовим є високий рівень деталізації та точне відтворення кольорів, панкратичні об'єктиви залишаються незамінними [5, 6].

Щоб зробити варіолінзи конкурентоспроможними та наблизити їх до заміни традиційних зум-об'єктивів, необхідні дослідження у таких напрямках:

- Розширення діапазону фокусних відстаней — створення конструкцій, здатних забезпечити плавне регулювання у широких межах.
- Зменшення оптичних аберацій — розробка матеріалів та методів керування, які мінімізують спотворення зображення.
- Підвищення прозорості й однорідності матеріалів — особливо для рідкокристалічних та полімерних систем.
- Оптимізація енергоспоживання — варіолінзи мають бути енергоефективними, щоб інтегруватися у мобільні пристрої.
- Стабільність і довговічність — необхідно забезпечити стійкість до старіння матеріалів, температурних коливань та механічних навантажень.
- Масове виробництво — створення технологій виготовлення, придатних для індустріального масштабу за доступною ціною.

1.2 Типи варіолінз

Враховуючи різноманітність сучасних технологій, варіолінзи реалізуються у кількох основних конструктивних і функціональних варіантах. Кожен із типів має свої особливості, переваги та обмеження, що визначають сферу їх застосування і технічні можливості [7]. Для зручності для варіолінз можна скласти класифікацію за типом керування (Рис. 1.1). Розглянемо основні типи варіолінз, що нині найбільш активно розробляються і впроваджуються.

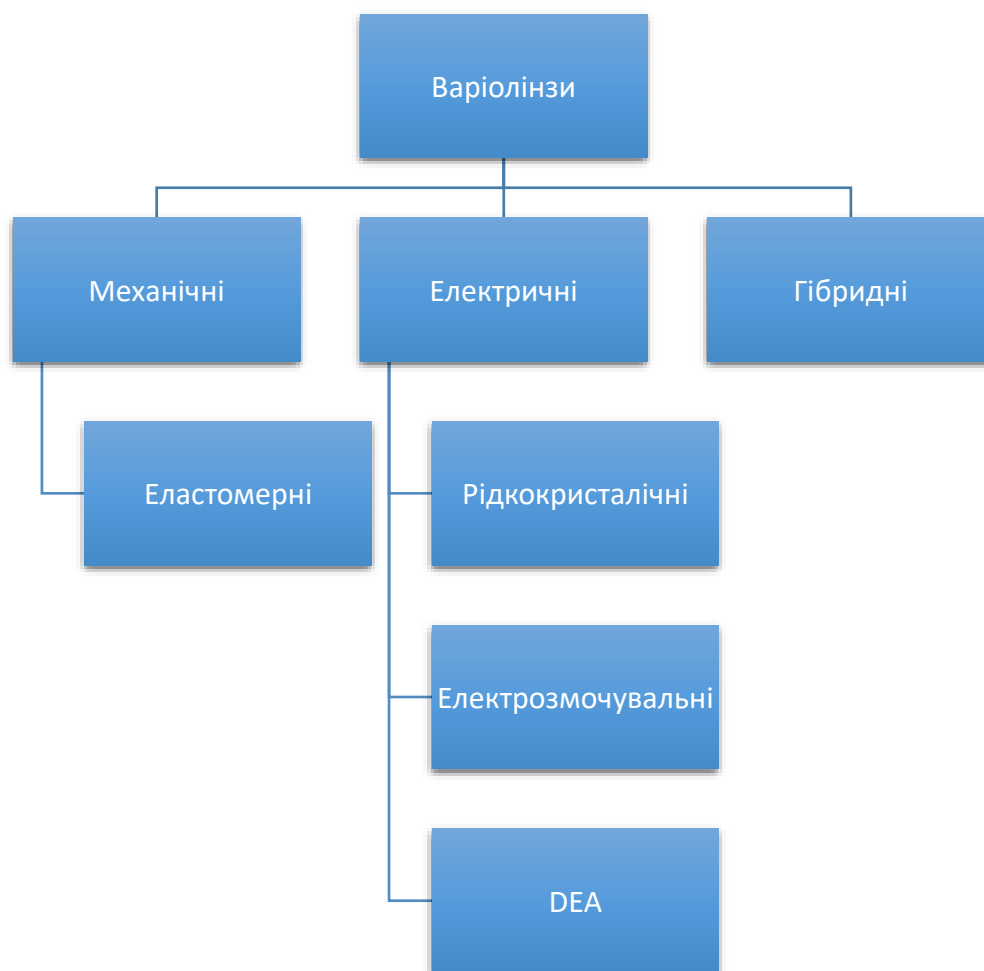


Рис. 1.1 - Класифікація варіолінз за типом керування

Незалежно від типу варіолінз, принцип їх керування є подібним (Рис. 1.2): від подачі команди на комп'ютер до фактичної зміни фокусної відстані лінзи. Процес можна представити наступними етапами [8, 9]:

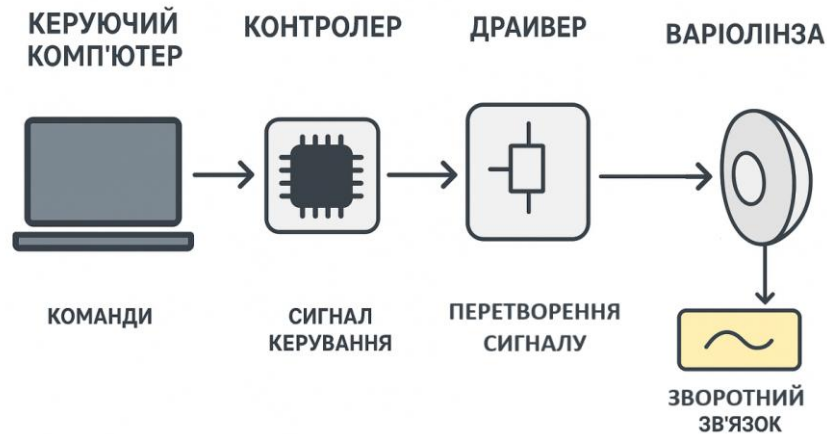


Рис 1.2 - Процес керування варіолінзою

1) Керуючий комп'ютер або контролер

Користувач задає бажані параметри фокусування (наприклад, фокусну відстань або оптичну силу) через спеціальне програмне забезпечення.

2) Формування сигналу управління

Програмне забезпечення перетворює команду користувача в цифровий сигнал або послідовність команд, придатних для передачі на апаратну частину.

3) Драйвер варіолінзи

Цей модуль відповідає за перетворення сигналу від комп'ютера в форму, зрозумілу для приводу лінзи: електричний імпульс, напругу або інші фізичні впливи, залежно від типу варіолінзи (еластомерна, рідкокристалічна, ферофлюїдна тощо).

4) Привід лінзи

Привід безпосередньо змінює форму або властивості лінзи, наприклад: змінює кривизну еластомерної мембрани; регулює форму рідинного меніска через електрокапілярні ефекти; впливає на розподіл ферофлюїду або рідкокристалічного шару.

5) Зміна фокусної відстані лінзи

Після впливу приводу змінюється оптична сила лінзи, що дозволяє сфокусувати зображення на потрібній відстані.

Таким чином, незалежно від конкретного типу варіолінзи, весь процес керування відбувається за єдиною логікою: команда користувача → обробка сигналу → перетворення драйвером → вплив приводу → зміна фокусу [7, 8].

1.2.1 Функціональні параметри та принцип роботи варіолінз

У попередньому підрозділі було розглянуто класифікацію варіолінз та особливості їхнього керування. Незалежно від типу конструкції, керування оптичною силою таких лінз відбувається за схожим принципом — шляхом впливу на фізичні властивості середовища чи межі розділу фаз, що формують оптичний елемент. При цьому використовуються різні фізичні ефекти, зокрема електрозмочування, деформація еластомерних мембран, діелектрофорез або інші механізми, які забезпечують зміну кривизни поверхні чи показника заломлення.

Таким чином, подальший розгляд буде зосереджено на принципах роботи варіолінз, що дозволяють зрозуміти, яким чином керуючі сигнали перетворюються у зміну фокусної відстані та оптичної сили. Це створює основу для оцінки їхніх функціональних можливостей, переваг і обмежень у різних практичних застосуваннях.

Варіолінзи функціонують на основі адаптації оптичних параметрів за допомогою фізичних або хімічних змін в їх структурі без традиційного механічного переміщення. Основним параметром, що регулюється, є фокусна відстань, або, що еквівалентно, оптична сила лінзи. Зміна фокусної відстані досягається через зміну кривизни оптичної поверхні або показника заломлення середовища, що формує лінзу [7, 8].

Рідкокристалічні варіолінзи

У рідкокристалічних варіолінзах електричне поле орієнтує молекули рідких кристалів, змінюючи їх анізотропний показник заломлення, що призводить до плавної зміни оптичної сили. Робочий діапазон оптичної сили таких систем зазвичай становить від кількох до близько 20 діоптрій, залежно від товщини шару та властивостей рідких кристалів. Світловий діаметр варіолінз цього типу зазвичай варіюється від 1 до 10 мм, обмежений технологією виготовлення та однорідністю поля електричного впливу [7].

Цей тип використовує властивість рідких кристалів змінювати показник заломлення під впливом електричного поля. Регулювання електричного потенціалу

дозволяє змінювати оптичну кривизну лінзи, що спричиняє зміну фокусної відстані. Рідкокристалічні варіолінзи характеризуються низьким енергоспоживанням і високою точністю управління, але мають обмеження у світлосилі та робочих температурах [10].

Коли до рідкокристалічної лінзи подається напруга, орієнтація деяких молекул рідкого кристала змінюється, що, в свою чергу, змінює спосіб заломлення світла при проходженні через лінзу. Регулюючи напругу, можна створити такі самі хвильові фронти світла (поверхня, що вказує напрямок світла), як і у звичайних опуклих або увігнутих лінзах, що дозволяє лінзі фокусувати або розсіювати світло (Рис. 1.3). Крім того, фокусну відстань можна вільно регулювати, точно налаштувавши напругу.

Така лінза може досягати різних оптичних сил просто шляхом зміни напруги — саме це робить рідкокристалічні лінзи такими інноваційними.

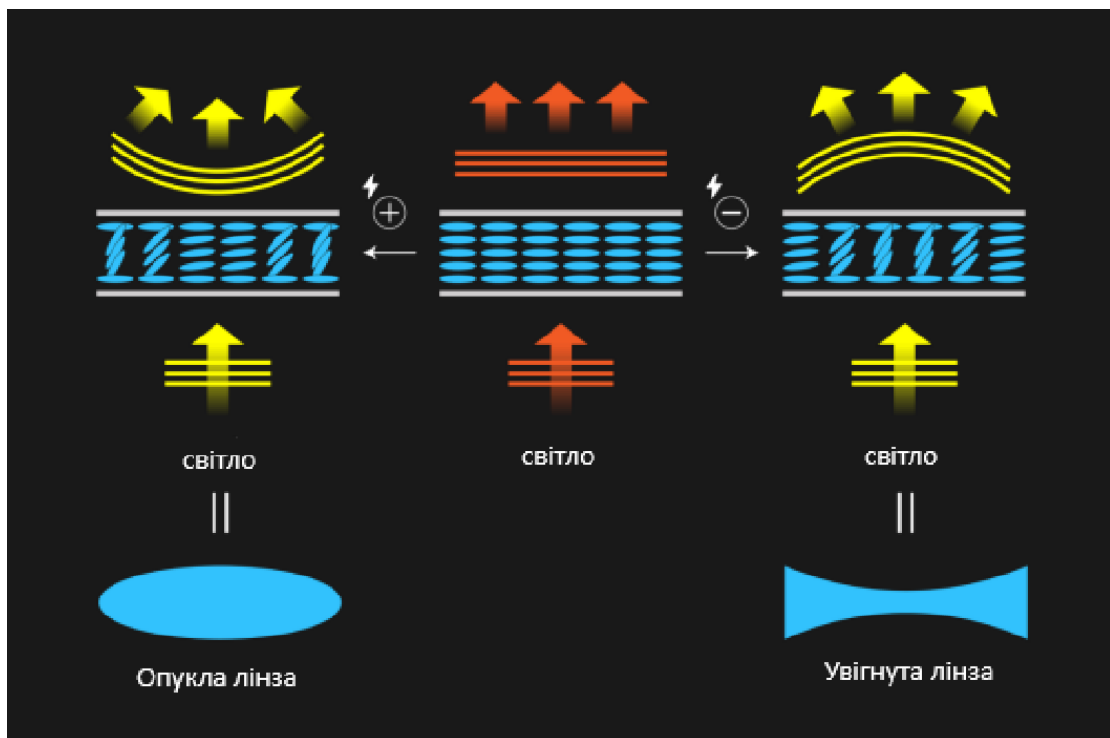


Рис. 1.3 - Принцип дії рідкокристалічних лінз [11]

З Рис. 1.3 бачимо, що (Посередині) коли напруга не подається, хвильовий фронт світла залишається незмінним при проходженні через рідкокристалічну лінзу. (Ліворуч) Коли напруга подається в одному напрямку, світло сходиться в одній точці, як при проходженні через опуклу лінзу. (Праворуч) Коли напруга подається в

протилежному напрямку, світло розходиться, як при проходженні через увігнуту лінзу [11].

Сучасний етап розвитку рідкокристалічних варіолінз та їхнє комерційне впровадження

Матеріали

- Рідкі кристали: електронно-чутливі суміші з високою прозорістю та швидким відгуком, стабільні при температурних коливаннях.
- Електроди: прозорі провідні шари (ІТО на склі або полімері), що забезпечують контроль електричного поля.
- Ізоляційні та вирівнювальні шари: тонкі плівки для правильного вирівнювання молекул і запобігання короткому замиканню.

Останні наукові та промислові тренди

- Багатозонні і асферичні електроди — для корекції аберацій і розширення діапазону фокусування.
- Покращені рідкі кристали та вирівнювальні шари — підвищення швидкості реакції та стабільності.
- Інтеграція з електронікою — алгоритми автофокусування та активна компенсація температурних змін.
- Гібридні конструкції — комбінування LC шарів з іншими варіолінзами (DEA або мембранними) для оптимізації характеристик [10, 12].

Рідкокристалічні варіолінзи перебувають на стадії активних досліджень та поступового впровадження в серійні продукти. Наукові групи та компанії продовжують удосконалювати технології керування прозорими електродами, швидкодію та стабільність рідких кристалів, а також підвищують діапазон зміни фокусної відстані. Незважаючи на перспективність, широкомасштабний промисловий випуск таких лінз поки обмежений через високу собівартість, складність виготовлення та потребу у спеціальних умовах інтеграції в оптичні системи [10].

Наразі рідкокристалічні варіолінзи застосовуються у вузьких сферах — наприклад, у науковій оптиці, системах мікроскопії, смартфонних камерах і деяких

моделях окулярів з автофокусом. Серед провідних компаній, що займаються їхнім розвитком та комерціалізацією, можна відзначити Varioptic, Optotune, а також низку азійських виробників, зокрема HOYA та Samsung, які тестують інтеграцію технології у споживчу електроніку [13, 14].

Таким чином, рідкокристалічні варіолінзи перебувають на етапі переходу від лабораторних розробок до комерційних рішень обмеженого масштабу, і найближчими роками очікується розширення їхнього використання у портативній оптиці та медичних приладах [7].

Варіолінзи з ефектом електрокапілярності

Використовують зміни форми рідинного меніска під впливом електричного поля. Електрокапілярні варіолінзи змінюють форму рідинного меніска під дією електричного поля, що дозволяє регулювати оптичну силу з високою швидкістю (десятки мілісекунд) і точністю. Робочий діапазон оптичної сили таких лінз може сягати 40–50 діоптрій, а світлові діаметри варіюються від 1 до 10 мм, що робить їх особливо зручними для мініатюрних оптичних систем, наприклад, у смартфонах і медичних приладах [7].

Стан розвитку рідинних варіолінз

Рідинні варіолінзи є однією з найбільш перспективних технологій адаптивної оптики, що вже вийшла за межі лабораторних досліджень і поступово інтегрується у промислові продукти. Основний принцип їхньої роботи базується на зміні кривизни межі поділу двох рідин (зазвичай провідної та діелектричної) під дією електричного поля або механічного тиску (Рис. 1.4), що дозволяє динамічно регулювати фокусну відстань [5].

На відміну від рідкокристалічних лінз, рідинні варіолінзи характеризуються вищою швидкістю, великим діапазоном зміни оптичної сили та відносно простою конструкцією, що робить їх придатними для масового використання. Сьогодні вони вже застосовуються у смартфонних камерах, мініатюрних системах автофокусування, ендоскопах, мікроскопії та у промислових візуальних системах.

Матеріали

- Електроди: прозорі провідні шари (ІТО на склі або полімері), що дозволяють пропускати світло та витримувати електричне поле.
- Рідини: використовуються масла з високою прозорістю і контрольованими показниками заломлення, а також із стабільністю до електричного впливу та мінімальним випаровуванням.
- Ізоляційні покриття: на електроди наносять гідрофобні тонкі плівки для керування змочуваністю та запобігання електролізу [7].

Останні наукові та промислові тренди

- Асферичні та багатозонні електроди — дозволяють коригувати аберації та покращувати оптичну роздільну здатність.
- Мікрофлюїдні конструкції — розробляються для збільшення діапазону зміни фокусної відстані та стабілізації меніска.
- Інтеграція з електронікою та AI-контролем — автофокусування з використанням сенсорів та алгоритмів компенсації нестабільності меніска [13].

Серед провідних виробників варто відзначити Varioptic (Рис. 1.5), яка першою комерціалізувала технологію електрозмочування; Optotune, що активно впроваджує рідинні лінзи у системи технічного зору та медичну оптику; а також низку азійських компаній, включно з Samsung і Sony, які інтегрують подібні рішення у мобільну електроніку.

Таким чином, рідкі варіолінзи перебувають на стадії активного комерційного використання: вони вже випускаються серійно, але основне зростання їхнього ринку прогнозується у найближчі роки завдяки розвитку мобільних пристроїв, медичної діагностики та промислової автоматизації [6].

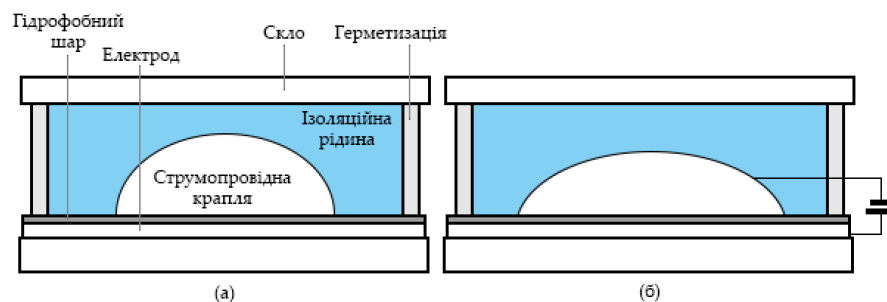


Рис. 1.4 – Будова та принцип дії електрозмочувальних лінз

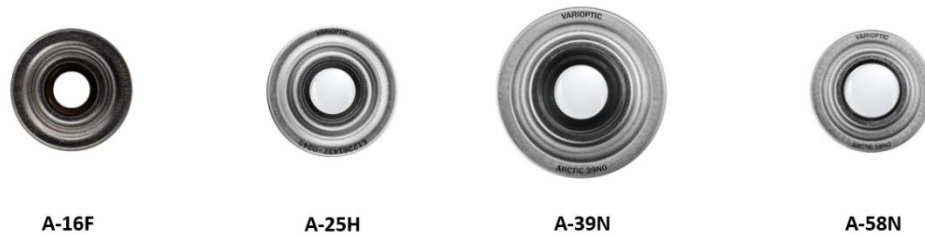


Рис. 1.5 - Рідинні адаптивні лінзи від компанії Varioptic [13]

Таблиця 1.2 - Основні характеристики варіолінз від компанії Varioptic [13]

Серія продукту	Діаметр лінзи (мм)	Чиста апертура (мм)	Діапазон оптичних сил (дптр)
A-16F	6.2	1.6	-5 до + 15
A-25H	7.75	2.5	-5 до + 13
A-39N	13	3.9	-5 до + 15
A-58N	13	5.8	-5 до + 10

Варіолінзи на основі діелектричних еластомерних приводів

Варіолінзи на основі діелектричних еластомерних приводів (DEA) працюють за принципом зміни форми електроактивного полімеру під впливом електричного поля, що викликає деформацію оптичної поверхні (Рис. 4). Це забезпечує плавне і швидке регулювання оптичної сили в діапазоні приблизно від 5 до 30 діоптрій із високою точністю. Світлові діаметри DEA-варіолінз коливаються від 5 до 15 мм залежно від конструкції. До переваг DEA належать висока швидкість відгуку (до кількох мілісекунд), мала вага, компактність і енергоефективність [6].

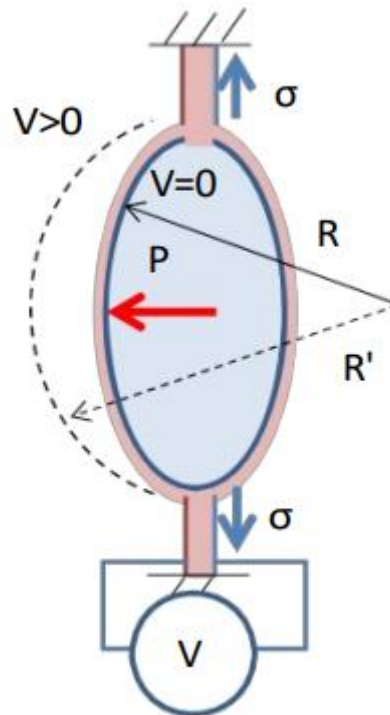


Рис. 1.6 - Будова та принцип дії варіолінз на основі DEA

Стан розвитку варіолінз на основі діелектричних еластомерних приводів

Варіолінзи, що працюють на діелектричних еластомерних приводах (DEA), належать до новітнього покоління адаптивних оптичних елементів. Їхня робота базується на властивостях тонких полімерних плівок, які при подачі електричної напруги здатні розтягуватися та змінювати свою форму. Якщо така плівка використовується як гнучка мембрана, що утримує рідину, то її деформація призводить до зміни кривизни поверхні й відповідно – до регулювання фокусної відстані лінзи [15].

Головна перевага цього підходу полягає у високій швидкодії, малій вазі та можливості створення ультратонких і енергоефективних оптичних систем. DEA-приводи забезпечують більший діапазон деформацій у порівнянні з п'єзоелектричними чи механічними приводами, що відкриває перспективи для створення варіолінз із широким діапазоном зміни оптичної сили [15, 16].

Матеріали

- Еластомери: силіконові або поліуретанові плівки з високою деформаційною здатністю і низьким розтягуванням; критично важлива стабільність при багатократних циклах.

- Електроди: прозорі, гнучкі, проводять електрику шари (наприклад, графен, вуглецеві нанотрубки, провідні полімери).
- Контролери та драйвери: формують високовольтний сигнал, що подається на електроди, для точної регуляції кривизни [7].

Останні наукові та промислові тренди

- Комбіновані конструкції мембрана + DEA — для зменшення аберацій та розширення діапазону фокусування.
- Покращені еластомери та електроди — зниження креепу, підвищення прозорості і довговічності.
- Інтеграція з електронікою — вбудовані драйвери та алгоритми автофокусування для реального часу.
- Гнучкі та надтонкі лінзи — перспективні для носимих пристроїв та AR/VR модулів.

На сьогодні такі лінзи перебувають переважно на стадії дослідних зразків і пілотних проектів. Дослідження активно ведуться у провідних університетах та наукових центрах Європи, США та Азії. Серед компаній, які проявляють інтерес до цієї технології, варто відзначити Optotune, а також низку стартапів, що спеціалізуються на гнучкій електроніці та «м'яких» приводах [14, 16].

Попри те, що масового комерційного виробництва DEA-варіолінз поки не існує, вони розглядаються як одна з найперспективніших технологій майбутнього, особливо для застосування у носимих дисплеях, пристроях віртуальної та доповненої реальності, а також у портативних медичних інструментах [15, 16].

Еластомерні мембранні варіолінзи

Еластомерні мембранні варіолінзи працюють на основі тонкої прозорої мембрани з еластичного полімеру (часто силікону), що розтягується під дією зовнішнього тиску або механічного/електростатичного приводу (Рис. 1.8, 1.9). Мембрана відділяє дві рідини з близькими показниками заломлення, і зміна її кривизни призводить до зміни фокусної відстані. Завдяки простоті конструкції та високій надійності цей тип варіолінз розглядається як одна з базових технологій адаптивної оптики [7, 8].

Робочий діапазон оптичної сили

Типові прототипи і комерційні зразки еластомерних мембранних лінз демонструють зміну оптичної сили в межах від -15 до $+60$ діоптрій, залежно від конструкції та матеріалів мембрани. У більш компактних версіях діапазон становить приблизно $-10 \dots +30$ D, чого достатньо для застосування у мікроскопії, технічному зорі та системах автофокусування [14].

Світловий діаметр

Світлові діаметри еластомерних варіолінз зазвичай знаходяться в межах 2–10 мм для портативних оптичних систем (смартфони, компактні камери, окуляри) та можуть досягати 15–20 мм у спеціалізованих медичних або наукових приладах. Розробки для AR/VR-пристроїв орієнтуються на діаметри 6–8 мм, що забезпечує достатню апертуру при мінімальних габаритах [18].

Сучасний стан розвитку

Технологія перебуває на етапі поступового переходу від лабораторних розробок до обмеженого серійного виробництва. Основні завдання нинішніх досліджень — це підвищення довговічності мембран (щоб витримували сотні тисяч циклів без деградації), зменшення гістерезису та розширення діапазону зміни фокусної відстані [7, 17].

Матеріали

- Мембрани: виготовляють з прозорих еластомерів (силіконні полімери, ПДМС та ін.), що мають високу оптичну якість, низьку кислотність і стабільність при циклічній деформації. Вибір матеріалу критичний через, старіння і адгезію до корпусу.
- Рідини: оптично прозорі масла або гелі з контрольованими показниками заломлення й мінімальним випаровуванням [6].

Останні наукові та промислові тренди:

- Оптимізація мембранних форм (асферики, багатозонні профілі) — для зменшення аберацій та покращення роздільної здатності при великих змінах оптичної сили.

- Нові приводи — дослідження DEA (діелектричних еластомерів) дають перспективу більших діапазонів та швидкості, але вимагають вирішення питань довговічності й герметичності.
- Матеріалознавство мембран — робота над еластомерами з меншим розтягуванням і кращою оптичною стабільністю.
- Інтеграція з електронікою — вбудовані драйвери й алгоритми автофокусування, що використовують датчики й інтелектуальну калібровку, вже є у комерційних рішеннях. Компанія Optotune вже має готові рішення на ринку у даному контексті [14]. Приклад таких лінз можна побачити на Рис. 1.7.



Рис. 1.7 - Варіолінза ECC-1C з вбудованим драйвером [14]

Компанії та виробники:

- Optotune (Швейцарія) — один з лідерів у сфері мембранних рідинних лінз, пропонує серійні продукти з діаметрами 3–16 мм та діапазоном оптичної сили до ± 20 дптр, активно постачає рішення для технічного зору та медичної діагностики (Рис. 1.10) [14].

- НОУА (Японія) — веде розробки адаптивних лінз для окулярів і медичних пристроїв на основі мембранної технології.
- TAG Optics (США, нині входить до Mitutoyo) — спеціалізується на ультрашвидких варіолінзах, які теж базуються на деформації мембран, з високою швидкістю (до десятків кілогерц).
- Низка стартапів та університетських груп (EPFL, MIT, KAIST) працюють над мембранними прототипами для AR/VR гарнітур, біомедичних датчиків і компактних камер.

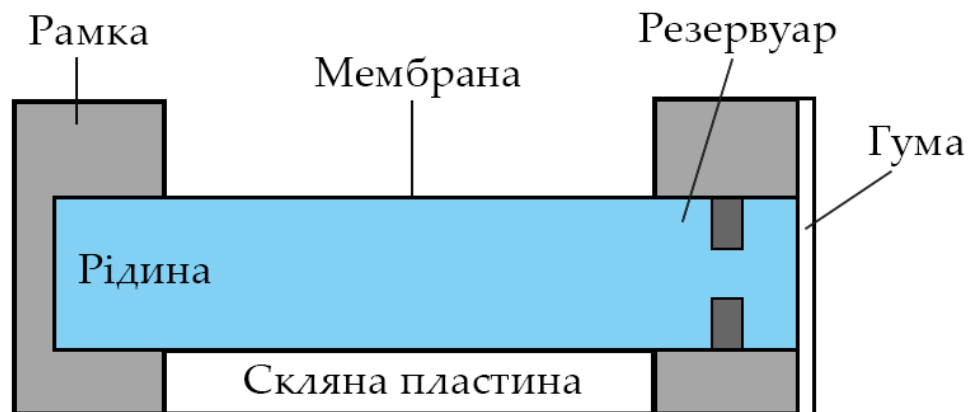


Рис. 1.8 - Будова еластомерної мембранної варіолінзи

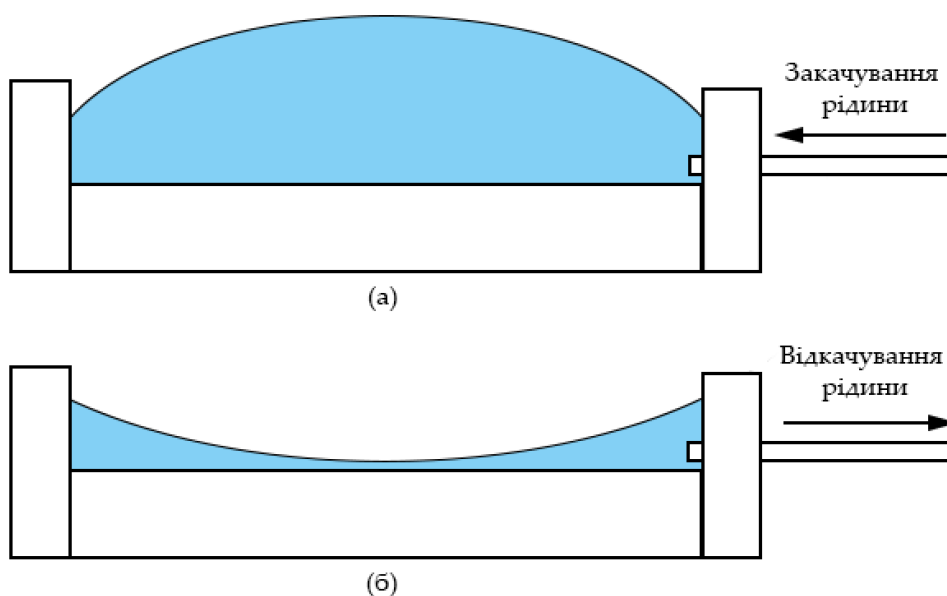


Рис. 1.9 - Принцип дії еластомерної мембранної варіолінзи



Рис. 1.10 – Еластомерні мембрані варіолінзи компанії Optotune [14]

Таблиця 1.3 - Основні характеристики еластомерних мембранних варіолінз від компанії Optotune [14]

Серія продукту	Тип лінзи	Чиста апертура (мм)	Діапазон оптичних сил (дптр)
EL-3-10	Електрично керована варіолінза	3	-13 до + 13
EL-12-30-TC	Електрично керована варіолінза	12	-6 до + 10
EL-16-40-TC	Електрично керована варіолінза	16	-10 до + 10
ML-20-37	Механічно керована варіолінза	20	-18 до + 18

До основних переваг варіолінз належать:

- Відсутність рухомих жорстких елементів, що знижує механічний знос і підвищує надійність;
- Компактність і мала вага, що важливо для портативних і мобільних пристроїв;
- Висока швидкість регулювання фокусної відстані, необхідна для динамічних систем;
- Енергоефективність у порівнянні з традиційними механічними системами фокусування [7, 18].

Натомість, існують і певні недоліки:

- Обмеження у світлосилі та світловому діаметрі через фізичні властивості матеріалів і технології виготовлення;
- Чутливість до температурних коливань і зовнішніх впливів, особливо у рідкокристалічних і рідинних системах;

- Складність забезпечення високої якості зображення через можливі аберації, нерівномірності поля керування;
- Вартість виготовлення та складність інтеграції у деякі оптичні системи [7, 18].

Проаналізувавши найпоширеніші типи варіолінз можна скласти розгорнуту порівняльну характеристику для кожного типу лінз (Табл. 1.4).

Таблиця 1.4 - Переваги та недоліки кожного типу варіолінз

	Переваги	Недоліки
Еластомерні мембранні варіолінзи	<ul style="list-style-type: none"> ● Компактність і висока довговічність. ● Швидкість реакції ● Низька вага та інтеграція 	<ul style="list-style-type: none"> ● Розтягування і деградація мембрани ● Аберації та якість зображення ● Теплова й довкіллева стабільність
Електрокапілярні варіолінзи	<ul style="list-style-type: none"> ● Висока швидкість регулювання ● Компактність і простота інтеграції ● Низьке енергоспоживання 	<ul style="list-style-type: none"> ● Нестабільність меніска ● Діапазон зміни фокусної відстані ● Аберації та якість зображення
DEA варіолінзи	<ul style="list-style-type: none"> ● Велика амплітуда зміни фокусної відстані ● Компактність і легкість інтеграції ● Швидка реакція 	<ul style="list-style-type: none"> ● Низька надійність і довговічність ● Висока напруга активації ● Необхідна теплова і довкіллева стабільність
Рідкокристалічні варіолінзи	<ul style="list-style-type: none"> ● Відсутність рухомих механічних частин ● Тонка та легка конструкція ● Плавне і точне управління фазою ● Низьке енергоспоживання 	<ul style="list-style-type: none"> ● Обмежений діапазон зміни фокусної відстані ● Швидкість реакції ● Чутливість до температури ● Аберації

Таким чином, варіолінзи забезпечують ефективні засоби для регулювання оптичної сили в широкому спектрі застосувань, проте вибір конкретного типу залежить від специфічних вимог до діапазону зміни фокусної відстані, розміру апертури, швидкодії та надійності.

1.3 Тенденції розвитку варіолінз

Аналіз сучасних наукових публікацій показує, що розвиток варіолінз відбувається у кількох ключових напрямках. Один із головних трендів — зменшення габаритів та маси пристроїв, що дає змогу інтегрувати їх у портативні системи, зокрема окуляри доповненої та віртуальної реальності, мобільні камери та мікроскопічні оптичні сенсори [19, 20]. Досягнення в цій сфері базуються на впровадженні нових матеріалів, таких як еластомерні мембрани, рідкі кристали, електроактивні полімери та наноструктуровані покриття, що дозволяють зменшити енергоспоживання та збільшити швидкодію [21].

Ще одним важливим напрямом є розширення діапазону зміни оптичної сили варіолінз. У традиційних конструкціях цей параметр обмежується механічними характеристиками актуаторів та властивостями оптичного середовища, проте останні дослідження демонструють ефективні методи збільшення цього діапазону шляхом оптимізації геометрії мембрани, застосування комбінованих приводів (електромеханічних та гідравлічних) і використання нових типів актуаторів, зокрема діелектричних еластомерів [16, 19]. Розширення діапазону робить можливим використання варіолінз у ширшому спектрі пристроїв — від біомедичних ендоскопів до систем адаптивного зору в робототехніці.

Важливу увагу приділяють також покращенню оптичної якості. Сучасні дослідження спрямовані на зменшення аберацій та підвищення світлопропускання за рахунок застосування мультишарових просвітлювальних покриттів і асферичних профілів мембран. Особливу роль у цьому відіграють технології 3D-друку та мікролітографії, які дозволяють з високою точністю відтворювати необхідну форму та товщину оптичних елементів [22].

Окремою тенденцією є збільшення швидкості реакції варіолінз. У галузях, де важлива миттєва фокусна адаптація (наприклад, у системах машинного зору або VR-

гарнітурах), розробники зосереджені на скороченні часу перемикання між різними фокусними відстанями до кількох мілісекунд [20]. Цього досягають завдяки вдосконаленим схемам керування, оптимізації електродів і використанню матеріалів із високою еластичною відновлюваністю.

Нарешті, важливою сферою інновацій є інтеграція варіолінз із системами штучного інтелекту для автоматичного керування фокусуванням. Такі рішення дають змогу створювати автономні адаптивні оптичні системи, які можуть самостійно змінювати фокус у залежності від сцени, об'єктів чи умов освітлення, що відкриває перспективи для робототехніки, медицини та мобільних технологій [20, 22].

1.4 Трансфокатори

Трансфокатор, широко відомий як зум-об'єктив — це складна оптична система, головною відмінною рисою якої є здатність плавно змінювати свою фокусну відстань (f'), і, як наслідок, кутове збільшення та кутове поле зору (Рис. 1.11).

Трансфокатор складається з двох частин. Перша зум-афокальна система. Друга – фікс компонент з незмінною фокусною відстанню і фіксованим заднім фокальним відрізком. Через це трансфокатор теоретично зберігає незмінним положення зображення при змінах кутового збільшення афокальної системи.

На відміну від об'єктивів з фіксованою фокусною відстанню, трансфокатори надають оператору гнучкість у виборі кадрів та масштабування об'єкта без необхідності фізичної зміни об'єктива чи зміни власної позиції. Ця універсальність зробила їх стандартом у фото- та відеотехніці, а також незамінним компонентом у спеціалізованих оптичних приладах, таких як мікроскопи, приціли та геодезичні інструменти. Даний розділ розглядає фундаментальний принцип дії поширених схем трансфокаторів, еволюцію їх конструкцій та специфіку застосування у метрології.

1.4.1 Будова та принцип дії

Однією з найпоширеніших та найефективніших конструктивних схем трансфокатора є двокомпонентна система. Вона концептуально поділяється на два основні оптичні блоки (Рис. 1.12):

1. Передня афокальна зум-система: Це ключовий вузол, що відповідає безпосередньо за процес зумування. Його фундаментальна властивість — афокальність, тобто його загальна оптична сила дорівнює нулю. Це означає, що паралельний пучок променів, який входить у систему (наприклад, від віддаленого об'єкта), виходить з неї також паралельним пучком. Головна функція цього блоку — створювати змінне кутове збільшення (γ).

2. Задній основний об'єктив ('Фікс'): Це нерухомий об'єктив із постійною фокусною відстанню ($f'_{\text{фікс}}$). Він розташований за афокальною системою. Його завдання — отримувати паралельні пучки променів, що виходять з афокальної системи, і фокусувати їх у своїй задній фокальній площині. Саме в цій площині розташовується світлочутливий елемент (матриця камери, плівка або окулярна сітка) [4, 23].

Загальна фокусна відстань ($f'_{\text{сис}}$) всього трансфокатора визначається як добуток кутового збільшення афокальної системи на фокусну відстань нерухомого об'єктива:

$$f'_{\text{сис}} = \gamma * f'_{\text{фікс}}$$

Коли оператор змінює зум, механізм приводить у рух компоненти лише всередині передньої афокальної системи. Це призводить до плавної зміни її кутового збільшення γ . Оскільки $f'_{\text{фікс}}$ є величиною постійною, загальна фокусна відстань $f'_{\text{сис}}$ системи змінюється прямо пропорційно. Ключовою перевагою такої схеми є її здатність до парфокальності (збереження фокусу при зумуванні). Оскільки на нерухомий "фікс" завжди надходять паралельні пучки, він завжди формує чітке зображення в одній і тій самій площині, що значно спрощує конструкцію [24].

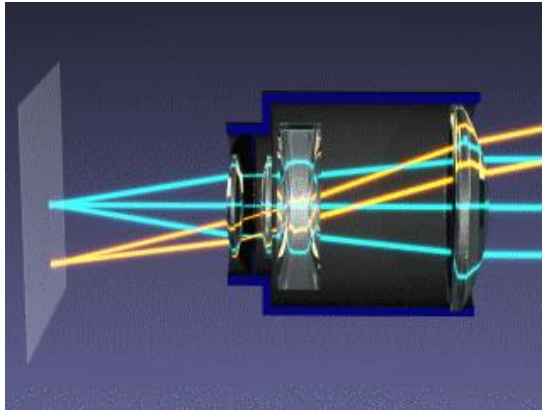


Рис. 1.11 - Принцип роботи трансфокатора

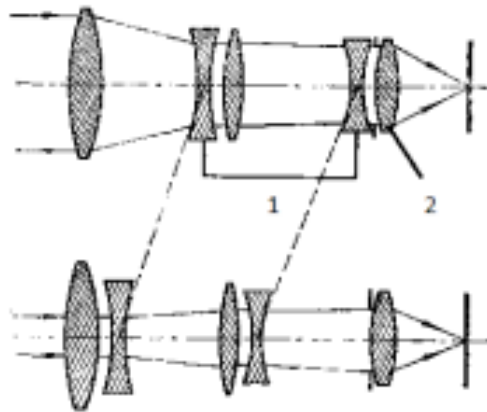


Рис 1.12 - Оптична схема трансфокатора

1.4.2 Еволюція конструкції афокального блоку

Складність та ефективність трансфокатора визначається саме конструкцією афокального зум-блоку, який пройшов значну еволюцію.

Традиційні механічні системи

Для досягнення високої кратності зуму (відношення $\frac{f'_{\text{макс}}}{f'_{\text{мін}}}$) та одночасної корекції складних оптичних аберацій (сферичної, хроматизму, коми) у всьому діапазоні, афокальний блок сам по собі є складною системою. Для цих цілей широко використовуються афокальні блоки, що складаються з трьох або більше компонентів (груп лінз). Під час зумування ці компоненти синхронно переміщуються один відносно одного за складними, точно розрахованими нелінійними законами (за допомогою кулачкових механізмів), що дозволяє досягти стабільно високої якості зображення [23].

Системи з активною оптикою

Сучасний напрямок розвитку трансфокаторів пов'язаний зі зменшенням або повною відмовою від громіздких механічних приводів на користь активних оптичних елементів.

Суть полягає в інтеграції варіолінз до складу оптичної системи. Введення таких елементів у конструкцію трансфокатора дозволяє:

- Мініатюризувати конструкцію та зменшити її вагу.
- Підвищити швидкість зумування та фокусування до мілісекунд.
- Спростити механічну компенсацію аберацій, переклавши частину роботи з механіки на електричне керування оптичною силою варіолінзи.

Таким чином, сучасний трансфокатор перетворюється на складну оптико-мехатронну систему, що поєднує як механічний рух, так і активне електричне керування оптичними характеристиками [24].

1.4.3 Сфери застосування

Функціональність трансфокаторів зумовила їх широке використання у різних галузях

Фото- та відеотехніка

Найбільш масове та відоме застосування — аматорська та професійна фото- і відеозйомка. Тут трансфокатор дає змогу оперативно змінювати кадр, обирати між широким полем зору для пейзажів та вузьким (з великим збільшенням) для зйомки віддалених об'єктів.

Метрологія та оптичне приладобудування

Менш очевидною, але важливою сферою є використання трансфокаторів у вимірювальних та спостережних приладах

У таких приладах (наприклад, у геодезичних далекомірах або військових прицілах) трансфокатор слугує не стільки для кадрування, скільки для точного вимірювання.

Отже трансфокатор є однією з найскладніших оптичних систем у масовому виробництві, що поєднує в собі точну оптику, прецизійну механіку, а в сучасних

моделях — і складну електроніку. Еволюціонуючи від чисто механічних пристроїв до систем з активними варіолінзами, вони продовжують розширювати свої можливості. Їхня роль є ключовою не лише у створенні візуального контенту, але й у вирішенні складних метрологічних завдань у науці та техніці [4].

Висновки до розділу:

У ході проведеного аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку варіофокальних лінз було виявлено, що ця технологія перебуває на етапі активного вдосконалення та комерціалізації. Розглянуті технічні принципи роботи варіолінз свідчать про значний потенціал цієї оптичної технології для застосування у сферах офтальмології, віртуальної та доповненої реальності, промислової оптики та робототехніки.

Дослідження показали, що сучасні розробки зосереджені на кількох ключових напрямках: підвищенні швидкості фокусування, розширенні діапазону зміни оптичної сили, зменшенні енергоспоживання, оптимізації конструкцій для підвищення довговічності та ергономічності, а також зниженні маси й габаритів лінз. Особливу увагу приділено інтеграції нових матеріалів, таких як діелектричні еластомерні актуатори та рідкі кристали, що відкриває нові можливості у досягненні високої точності фокусування та адаптивності систем.

Огляд наукових публікацій показав наявність значного інтересу до методів розширення робочого діапазону оптичної сили варіолінз, що є критичним параметром для їх застосування у прогресивних оптичних системах. Поряд із цим відбувається активний розвиток технологій зменшення хроматичних аберацій та підвищення оптичної прозорості, що безпосередньо впливає на якість переданого зображення.

Таким чином, можна зробити висновок, що варіофокальні лінзи є перспективною технологією, яка має всі передумови для широкого впровадження у найближчому майбутньому. Їх подальший розвиток залежатиме від удосконалення технологічних процесів виробництва, зниження вартості та адаптації конструкцій під потреби конкретних сфер застосування.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ПОЛОЖЕННЯ ВЗДОВЖ ОПТИЧНОЇ ОСІ ГОЛОВНИХ ТОЧОК КОМЕРЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ВАРІОЛІНЗ ФІРМ OPTOTUNE ТА CORNING®VARIOPTIC®

2.1 Задачі та мета досліджень

Мета дослідження: Визначити та проаналізувати залежність зміни положення головних точок вздовж оптичної осі для комерційних моделей варіолінз Optotune та Corning®Varioptic® як функцію від керуючого параметра, а саме оптичної сили варіолінзи.

Задачі дослідження:

1. Обрати репрезентативні комерційні моделі варіолінз Optotune та Corning®Varioptic® для експериментального дослідження.
2. Провести серію вимірювань положення головних точок для кожної моделі у середовищі Zemax, при різних значеннях оптичної сили варіолінзи.
3. Побудувати графічні залежності та знайти апроксимаційні функції для отриманих даних.
4. Провести порівняльний аналіз отриманих результатів і визначити ключові характеристики.

2.2 Метод досліджень

Метою даного дослідження було визначення положення головних точок (H та H' , де H - передня головна точка, а H' - задня головна точка) вздовж оптичної осі для обраних комерційних моделей варіолінз як функції від їхньої оптичної сили (Φ).

Положення головних точок нерухомої оптичної системи визначають, де саме відбувається фіктивне заломлення променів, і вони є ключовими параметрами для опису дії системи. Для варіолінз положення цих точок може змінюватися залежно від керуючого сигналу (у обраних нами лінзах це значення напруги, або кут повороту зубчатого колеса), який змінює форму або властивості робочого середовища лінзи, що, в свою чергу, змінює оптичну силу. Положення головних точок розраховується відносно деякої опорної площини (наприклад, першої поверхні лінзи) за допомогою відрізків S_H та $S'_{H'}$, де:

- S_H - відстань від опорної площини до передньої головної точки H .
- S'_H - відстань від опорної площини до задньої головної точки H' .

Ці відрізки пов'язані з фокусними відстанями f та f' та оптичною силою (Φ) лінзи. У середовищі Zemax розрахунок цих параметрів виконується автоматично на основі даних про геометрію та показники заломлення лінзи в режимі непараксіальної моделі.

Моделі варіолінз та середовище моделювання

Для дослідження було обрано шість комерційних моделей варіолінз від фірм Corning®Varioptic® (Arctic314, Arctic316, Arctic416) (Рис. 2.1) та Optotune (EL-10-30, EL-16-40, ML-20-37) (Рис. 2.2). Ці моделі презентують різні принципи роботи (варіолінзи з ефектом електрозмочування та еластомерні мембранні варіолінзи) та діапазони оптичної сили. Дослідження проводились у програмному середовищі Zemax - потужному інструменті для моделювання та аналізу оптичних систем. Використання Zemax дозволяє точно імітувати поведінку варіолінз шляхом параметризації змінної поверхні або матеріалу лінзи, що відповідає зміні її оптичної сили (Φ).



Рис. 2.1 - Варіолінзи обрані для дослідження компанії Varioptic



Рис. 2.2 - Варіолінзи обрані для дослідження компанії Optotune

2.3. Методика досліджень

Процес дослідження зміни положення головних точок виконувався поетапно для кожної з шести обраних моделей лінз:

- 1) Отримання готових моделей варіолінз від компанії розробника
- 2) Підготовка моделі до дослідження
- 3) Фіксування значень S_H (передній фокальний відрізок) та S'_H (задній фокальний відрізок), які безпосередньо вказують на положення передньої та задньої головних точок відповідно до опорної площини системи.
- 4) Збір та обробка даних: Отримані пари значень (Φ, S_H) та (Φ, S'_H) були експортовані для подальшого математичного аналізу, графічного представлення та пошуку апроксимаційних залежностей.

Ця методика дозволила отримати кількісні залежності $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ для кожної моделі варіолінзи з високою точністю, притаманною середовищу оптичного моделювання Zemax.

2.4 Результати досліджень

У цьому підрозділі представлено результати моделювання залежностей положення головних точок S_H та S'_H від оптичної сили Φ для обраних моделей варіолінз. Для кожної моделі наведено табличні дані, апроксимаційні функції та їх графіки. Перед початком дослідження середовище Zemax та конструктивні параметри кожної обраної варіолінзи було налаштовано додатково таким чином, щоб отримані значення величин кардинальних відрізків були точними. Ознайомитись з будовою та головними точками варіолінз можна на Рис. 2.3 -2.4.

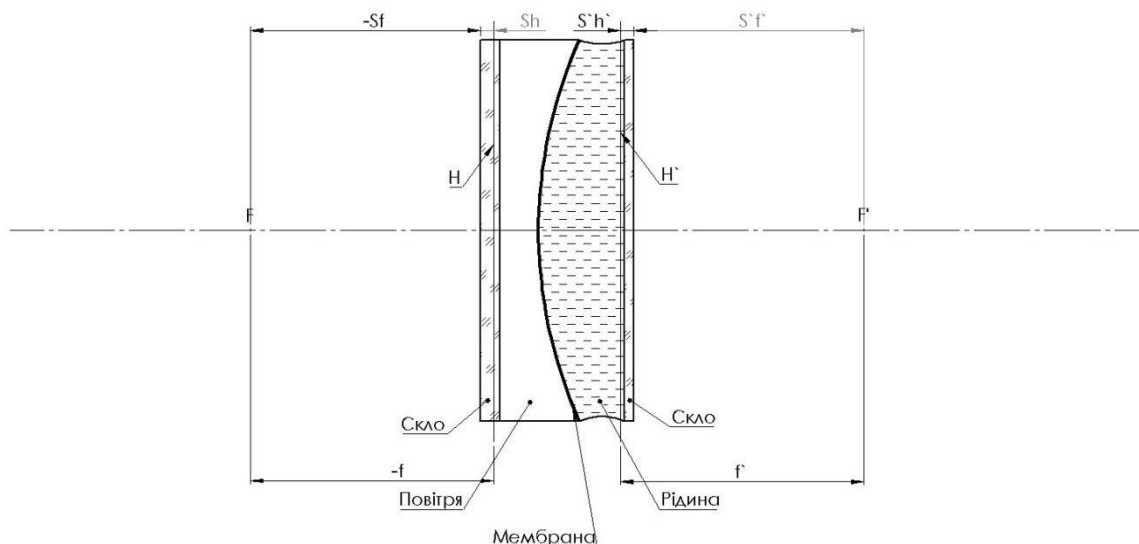


Рис. 2.3 - Головні відрізки та площини варіолінз Optotune

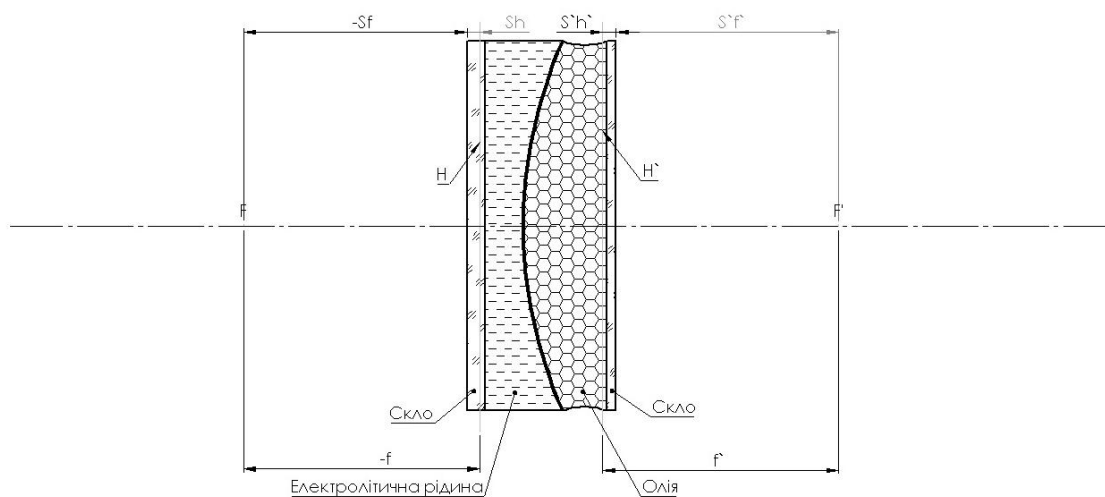


Рис. 2.4 - Головні відрізки та площини варіолінз Varioptic

Наступним кроком дослідження стало створення таблиць залежностей головних відрізків від оптичної сили для кожної варіолінзи, створення за отриманими даними рівнянь апроксимації та їх графіків.

Для варіолінзи EL-10-30

Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000
*	Standard	Cover glass f..	Infinity	0.500	BK7	5.000 U
2*	Standard	Cover glass b..	Infinity	4.049 E		5.000 U
3*	Standard	Adaptive surf..	16.381	3.301 E	*	5.500 U
4*	Standard	Container gla..	Infinity	0.500	BK7	5.000 U
IMA	Standard		Infinity	-		5.000 U

Рис. 2.5 - Конструктивні параметри EL-10-30

Multi-Configuration Editor			
Edit Solves Tools View Help			
Active : 3/3	Config 1	Config 2	Config 3*
1: CRVT	3	0.027	0.040
			0.061

Рис. 2.6 - Мультиконфігуратор Zemax параметри EL-10-30

Таблиця 2.1 - залежність головних відрізків від оптичної сили для EL-10-30

Оптична сила Φ , дптр	Передній фокальний відрізок $S_H(\Phi)$, мм	Задній фокальний відрізок $S_{H'}(\Phi)$, мм
8	4.923121	-2.449686
12	4.717138	-2.608108
18	4.378694	-2.868406

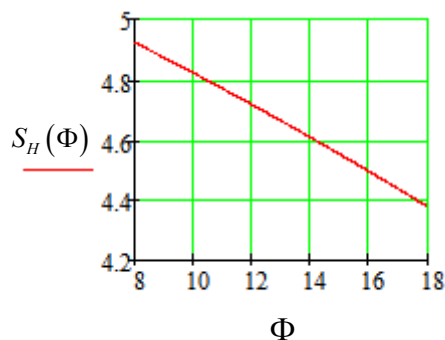
Для отриманих табличних даних у середовищі Mathcad було проведено математичну апроксимацію з метою отримання аналітичних залежностей $S_H(\Phi)$ та $S_{H'}(\Phi)$

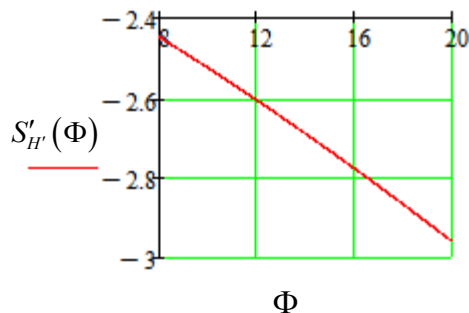
Апроксимовані функції $S_H(\Phi)$ та $S_{H'}(\Phi)$ для варіолінзи EL-10-30:

$$S_H(\Phi) = 5.288 - 0.042\Phi - 4.912 \cdot 10^{-4}\Phi^2$$

$$S_{H'}(\Phi) = -2.143 - 0.037\Phi - 3.777 \cdot 10^{-4}\Phi^2$$

Отримані графіки апроксимованих функцій $S_H(\Phi)$ та $S_{H'}(\Phi)$ для варіолінзи EL-10-30 зображено на Рис. 2.7 – 2.8.

Рис. 2.7 - Графік апроксимованої функції $S_H(\Phi)$ для EL-10-30

Рис. 2.8 - Графік апроксимованої функції $S'_H(\Phi)$ для EL-10-30**Для варіолінзи EL-16-40**

Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000	0.000
*	Standard	Cover glass f..	0.500	1.52,54.5	10.750	U 0.000
2*	Standard	Cover glass b..	4.887	E	10.250	U 0.000
3*	Standard	Adaptive surf..	-63.995	E OL1224_VIS	8.500	U 0.000
4*	Standard	Container gla..	0.500	1.52,54.5	9.730	U 0.000
IMA	Standard	Infinity	-		5.000	U 0.000

Рис. 2.9 - Конструктивні параметри EL-16-40

Multi-Configuration Editor							
Edit Solves Tools View Help							
Active : 1/6	Config 1*	Config 2	Config 3	Config 4	Config 5	Config 6	
1: MOFF	0	Abs. Min	Min EL-E-4	No current	Any current	Max EL-E-4	Abs. Max
2: CRVT	3	-0.016	-6.890E-003	1.709E-003	5.085E-003	0.010	0.018

Рис. 2.10 - Мультиконфігуратор Zemax параметри EL-16-40

Таблиця 2.3 - залежність головних відрізків від оптичної сили для EL-16-40

Оптична сила Φ , дптр	Передній фкальний відрізок $S_H(\Phi)$, мм	Задній фокальний відрізок $S'_H(\Phi)$, мм
-4.5	5.21453	-2.218269
-2	4.896652	-2.464285
-0.5	4.585787	-2.704873
1.5	4.463751	-2.79932
3	4.279465	-2.941944
5.5	3.978049	-3.17522

Апроксимовані функції $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ для варіолінзи EL-16-40:

$$S_H(\Phi) = 4.649 - 0.124\Phi + 4.082 \cdot 10^{-4}\Phi^2$$

$$S'_H(\Phi) = -2.659 - 0.097\Phi + 3.159 \cdot 10^{-4}\Phi^2$$

Отримані графіки апроксимованих функцій $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ для варіолінзи EL-16-40 зображено на Рис. 2.11 – 2.12.

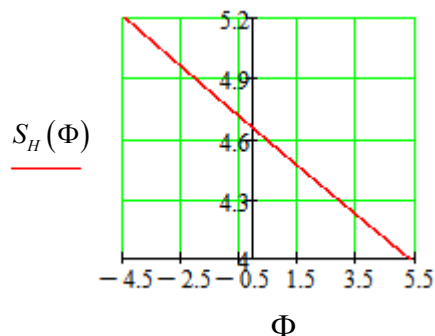


Рис. 2.11 - Графік апроксимованої функції $S_H(\Phi)$ для EL-16-40

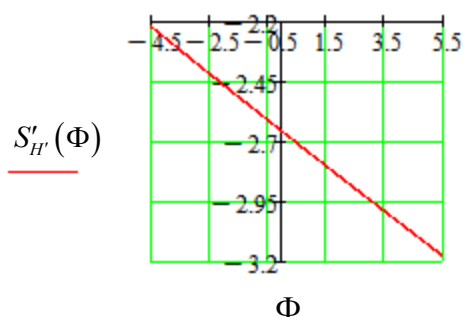


Рис. 2.12 - Графік апроксимованої функції $S'_H(\Phi)$ для EL-16-40

Для варіолінзи ML-20-37

Lens Data Editor: Config 3/3						
Edit Solves View Help						
Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	12329	Infinity	Infinity		0.000
1*	Standard	Cover Glass	Infinity	1.000	BK7	10.000 U
2*	Standard		Infinity	6.905 E		10.000 U
*	Standard	Tunable Lens	-19.677	1.457 E	*	10.000 U
4*	Standard	Cover Glass	Infinity	0.500	BK7	10.000 U
5*	Standard	Housing	Infinity	0.000		10.000 U
IMA	Standard		Infinity	-		10.735

Рис. 2.13 - Конструктивні параметри ML-20-37

Multi-Configuration Editor					
Edit Solves Tools View Help					
Active :	3/3	Config 1	Config 2	Config 3*	
1: MOFF	0	18 dpt	zero	-18 dpt	
2: TSP1	3	2.383	3.134	4.187	
3: CRVT	3	0.041	-2.608E-005	-0.051	

Рис. 2.14 - Мультиконфігуратор Zemax параметри ML-20-37

Таблиця 2.3 - Залежність головних відрізків від оптичної сили для
ML-20-37

Оптична сила Φ , дптр	Передній фокальний відрізок $S_H(\Phi)$, мм	Задній фокальний відрізок $S_{H'}(\Phi)$, мм
-18	7.56601	-1.385029
0	4.836839	-2.596525
18	2.69969	-3.598445

Апроксимовані функції $S_H(\Phi)$ та $S_{H'}(\Phi)$ для варіолінзи ML-20-37:

$$S_H(\Phi) = 4.836 - 0.135\Phi + 9.136 \cdot 10^{-4}\Phi^2$$

$$S_{H'}(\Phi) = -2.596 - 0.061\Phi + 3.234 \cdot 10^{-4}\Phi^2$$

Отримані графіки апроксимованих функцій $S_H(\Phi)$ та $S_{H'}(\Phi)$ для варіолінзи ML-20-37 зображено на Рис. 2.15 – 2.16.

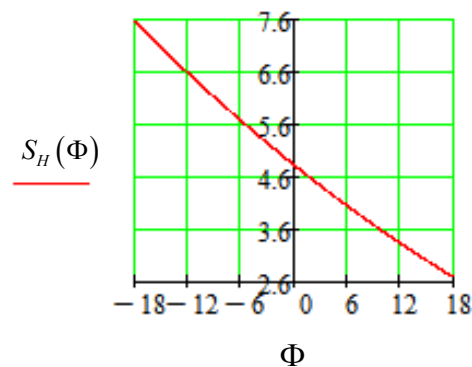


Рис. 2.15 - Графік апроксимованої функції $S_H(\Phi)$ для ML-20-37

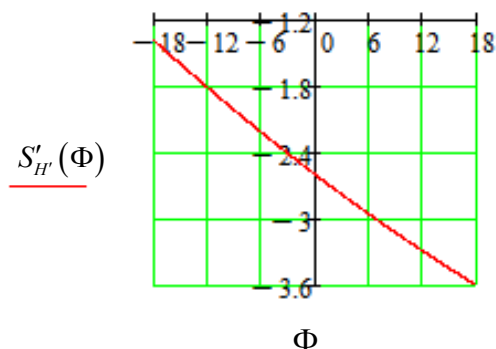


Рис. 2.16 - Графік апроксимованої функції $S_{H'}(\Phi)$ для ML-20-37

Для варіолінзи Arctic 314

Edit Solves View Help						
Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000 U
1*	Standard	Front window	Infinity	0.550	SODA_LIME	1.125 U
2*	Standard	Conductive ph..	Infinity	0.357	PC239W_0805	1.500 U
3*	Standard	Non conductiv..	-11.258	0.293 T	H197B_0805	1.500 U
*	Standard	Rear window	Infinity	0.300	SODA_LIME	1.500 U
IMA	Standard		Infinity	-		3.000 U

Рис. 2.17 - Конструктивні параметри Arctic 314

Multi-Configuration Editor															
Active	13/17	Config 1	Config 2	Config 3	Config 4	Config 5	Config 6	Config 7	Config 8	Config 9	Config 10	Config 11	Config 12	Config 13*	Config 1
1: HOFF	0	0 TO 25V	26V	27V	28V	29V	30V	31V	32V	33V	34V	35V	36V	37V	3
2: THIC	2	0.357	0.350	0.341	0.331	0.322	0.312	0.303	0.293	0.283	0.274	0.264	0.254	0.244	0.2
3: CRVT	3	-0.089	-0.076	-0.061	-0.045	-0.029	-0.012	5.260E-003	0.023	0.040	0.058	0.077	0.095	0.114	0.1

Рис. 2.18 - Мультиконфігуратор Zemax параметри Arctic 314

Таблиця 2.4 - Залежність головних відрізків від оптичної сили для Arctic 314

Оптична сила Φ , дптр	Задній фокальний відрізок	Передній фокальний відрізок
	$S'_H(\Phi)$, мм	$S_H(\Phi)$, мм
-9,81	-0,393394	0,619922
-8,45	-0,398344	0,614582
-6,73	-0,404566	0,607870
-4,96	-0,410787	0,601158
-3,15	-0,417075	0,594374
-1,30	-0,423430	0,587517
0,58	-0,429852	0,580589
2,50	-0,436274	0,573660
4,46	-0,442763	0,566660
6,45	-0,449252	0,559659
8,48	-0,455808	0,552586
10,54	-0,462431	0,545441
12,64	-0,469120	0,538224
14,76	-0,475810	0,531007
16,92	-0,482566	0,523718
19,10	-0,489389	0,516356
21,32	-0,496213	0,508995

Апроксимовані функції $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ для варіюлінзи Arctic 314:

$$S_H(\Phi) = 0.583 - 0.00365\Phi + 1.241 \cdot 10^{-5}\Phi^2 - 2.056 \cdot 10^{-7}\Phi^3 + 1.874 \cdot 10^{-9}\Phi^4$$

$$S'_H(\Phi) = -0.428 - 0.00338\Phi + 1.151 \cdot 10^{-5}\Phi^2 - 1.909 \cdot 10^{-7}\Phi^3 + 1.753 \cdot 10^{-9}\Phi^4$$

Отримані графіки апроксимованих функцій $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ для варіюлінзи Arctic 314 зображено на Рис. 2.19 – 2.20.

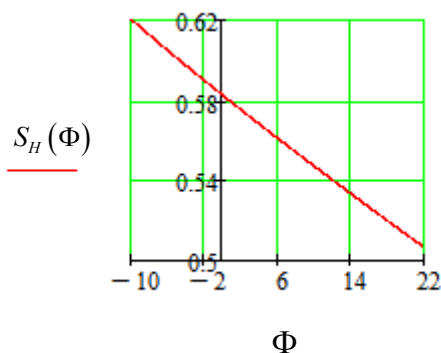


Рис. 2.19 - Графік апроксимованої функції $S_H(\Phi)$ для Arctic 314

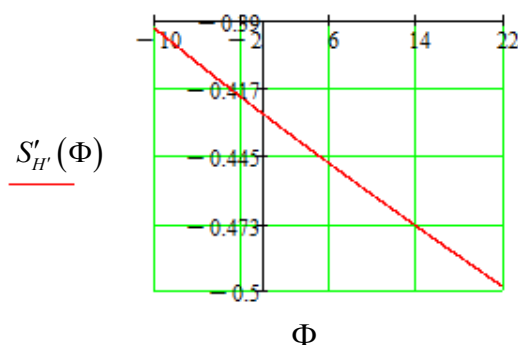


Рис. 2.20 - Графік апроксимованої функції $S'_H(\Phi)$ для Arctic 314

Для варіюлінзи Arctic 316

	Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000	U
1*	Standard	Front window	Infinity	0.550	SODA_LIME	1.240	U
2*	Standard	Conductive ph..	Infinity	0.175	PC239W_0805	1.700	U
3*	Standard	Non conductiv..	3.323	0.475	H197B_0805	1.700	U
*	Standard	Rear window	Infinity	0.300	SODA_LIME	1.250	U
IMA	Standard		Infinity	-		3.000	U

Рис. 2.21 - Конструктивні параметри Arctic 316

Active	1/19	Config 1*	Config 2	Config 3	Config 4	Config 5	Config 6	Config 7	Config 8	Config 9	Config 10	Config 11	Config 12	Config 13	Config 1
1: MOFF	0	0 TO 24V	24V	28V	30V	32V	34V	36V	38V	40V	42V	44V	46V	48V	5
2: THIC	2	0.400	0.394	0.393	0.394	0.372	0.358	0.344	0.330	0.315	0.300	0.285	0.270	0.255	0.2
3: CURV	3	-0.114	-0.107	-0.106	-0.094	-0.071	-0.058	-0.023	2.92E-003	0.023	0.037	0.055	0.114	0.154	0.1

Рис. 2.22 - Мультиконфігуратор Zemax параметри Arctic 316

Таблиця 2.5 - залежність головних відрізків від оптичної сили для
Arctic 316

Оптична сила Φ , дптр	Задній фокальний відрізок $S'_{H'}(\Phi)$, мм	Передній фкальний відрізок $S_H(\Phi)$, мм
-17.8	-0.364763	0.650812
-15.3	-0.368777	0.64681
-11.9	-0.369445	0.64576
-13.2	-0.374128	0.640708
-10.7	-0.383494	0.630604
-8.0	-0.392859	0.6305
-5.3	-0.402224	0.610396
-2.5	-0.411590	0.600292
0.4	-0.421624	0.589466
3.4	-0.431658	0.578640
6.5	-0.441693	0.567815
9.7	-0.451727	0.556989
12.9	-0.461762	0.546163
16.2	-0.472465	0.534616
19.6	-0.482499	0.52379
23.1	-0.493203	0.512243
26.6	-0.503906	0.500695
30.2	-0.514609	0.489148
33.9	-0.515278	0.488426

Апроксимовані функції $S_H(\Phi)$ та $S'_{H'}(\Phi)$ для варіолінзи Arctic 316:

$$S_H(\Phi) = 0.601 - 0.004\Phi - 9.694 \cdot 10^{-6}\Phi^2 + 1.639 \cdot 10^{-6}\Phi^3 - 2.135 \cdot 10^{-8}\Phi^4$$

$$S'_{H'}(\Phi) = -0.411 - 0.00357\Phi - 9.126 \cdot 10^{-6}\Phi^2 + 1.114 \cdot 10^{-6}\Phi^3 - 1.06 \cdot 10^{-8}\Phi^4$$

Отримані графіки апроксимованих функцій $S_H(\Phi)$ та $S'_{H'}(\Phi)$ для варіолінзи Arctic 316 зображено на Рис. 2.23 – 2.24.

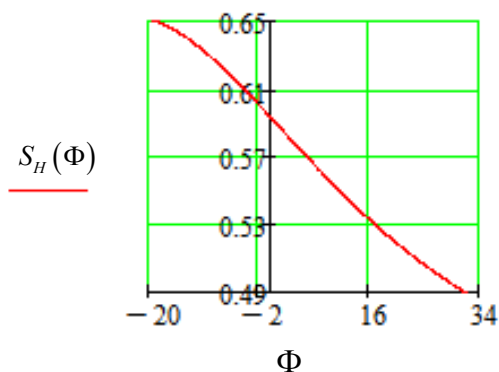


Рис. 2.23 - Графік апроксимованої функції $S_H(\Phi)$ для Arctic 316

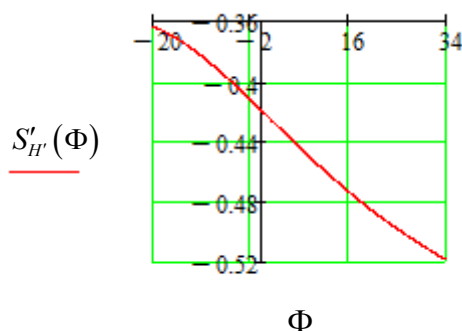


Рис. 2.24 - Графік апроксимованої функції $S'_H(\Phi)$ для Arctic 316

Для варіолінзи Arctic 416

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000 U	0.000
1*	Standard	Front window	Infinity	0.550	1.00,0.0	1.125	0.000
2*	Standard	Conductive ph..	Infinity	0.400	PC239W_0805	1.500 U	0.000
3*	Standard	Non conductiv..	-8.600	0.250 T	H197B_0805	1.500 U	0.000
*	Standard	Rear window	Infinity	0.300	SODA_LIME	1.500 U	0.000
IMA	Standard		Infinity	-		3.000 U	0.000

Рис. 2.25 - Конструктивні параметри Arctic 416

Active	1/2/15	Config 1	Config 2*	Config 3	Config 4	Config 5	Config 6	Config 7	Config 8	Config 9	Config 10	Config 11	Config 12	Config 13	Config 1
1: MOFF	0	0.20 24V	24V	28V	30V	32V	34V	36V	38V	40V	42V	44V	46V	48V	5
2: TRIC	3	0.400	0.394	0.393	0.394	0.372	0.358	0.344	0.330	0.315	0.300	0.285	0.270	0.255	0.2
3: CRV2	4	-0.114	-0.107	-0.106	-0.094	-0.071	-0.048	-0.023	2.92E-003	0.029	0.057	0.085	0.114	0.144	0.1

Рис. 2.26 - Мультиконфігуратор Zemax параметри Arctic 416

Таблиця 2.6 - залежність головних відрізків від оптичної сили для
Arctic 416

Оптична сила Φ , дптр	Задній фокальний відрізок $S'_{H'}(\Phi)$, мм	Передній фкальний відрізок $S_H(\Phi)$, мм
-12.5	-0.364763	0.838685
-11.6	-0.368777	0.834355
-11.43	-0.369445	0.833633
-10.19	-0.374128	0.828581
-7.69	-0.383494	0.818477
-5.15	-0.392859	0.808373
-2.5	-0.402224	0.798269
0.32	-0.411590	0.788165
3.14	-0.421624	0.777340
6.12	-0.431658	0.766514
9.16	-0.441693	0.755688
12.34	-0.451727	0.744862
15.56	-0.461762	0.734037
18.8	-0.472465	0.722489
22.14	-0.482499	0.711664
25.59	-0.493203	0.700116
29.01	-0.503906	0.688569
32.27	-0.514609	0.677021
32.5	-0.515278	0.6763

Апроксимовані функції $S_H(\Phi)$ та $S'_{H'}(\Phi)$ для варіолінзи Arctic 416:

$$S_H(\Phi) = 0.789 - 3.731 \cdot 10^{-3} \Phi - 1.562 \cdot 10^{-5} \Phi^2 + 1.806 \cdot 10^{-7} \Phi^3 - 1.427 \cdot 10^{-9} \Phi^4$$

$$S'_{H'}(\Phi) = -0.411 - 3.458 \cdot 10^{-3} \Phi - 1.448 \cdot 10^{-5} \Phi^2 + 1.674 \cdot 10^{-7} \Phi^3 - 1.321 \cdot 10^{-9} \Phi^4$$

Отримані графіки апроксимованих функцій $S_H(\Phi)$ та $S'_{H'}(\Phi)$ для варіолінзи Arctic 416 зображено на Рис. 2.27 – 2.28.

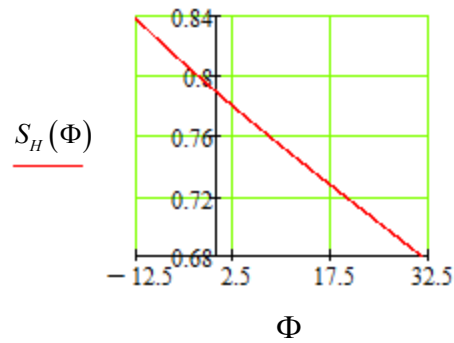


Рис. 2.27 - Графік апроксимованої функції $S_H(\Phi)$ для Arctic 416

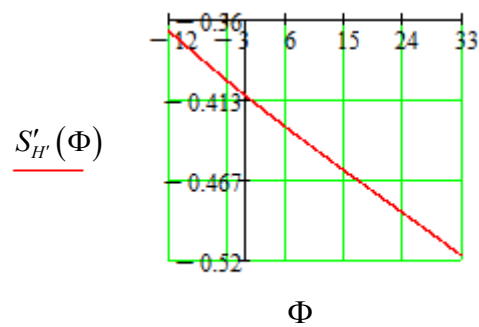


Рис. 2.28 - Графік апроксимованої функції $S'_H(\Phi)$ для Arctic 416

2.4 Апроксимація функцій $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$

Процес апроксимації функцій $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ було виконано у середовищі MathCAD на основі попередньо отриманих значень $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ в середовищі Zemax. Процес апроксимації показано на прикладі варіолінзи ML-20-37.

Дано

$$\Phi := \begin{pmatrix} -18 \\ 0 \\ 18 \end{pmatrix} \quad \text{Sh}(\Phi) := \begin{pmatrix} 7.564758 \\ 4.835586 \\ 2.698438 \end{pmatrix} \quad \text{S'h}(\Phi) := \begin{pmatrix} -1.383359 \\ -2.595955 \\ -3.598784 \end{pmatrix}$$

Рис. 2.29 – Вхідні дані функції $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ отримані в Zemax

Апроксимація функцій методом регресії:

Для цього використовуємо степеневий поліном. Оскільки кількість точок всього три, то число K повинно бути на одиницю менше

$$k := 2$$

Апроксимуємо функцію $S'h(\Phi)$:

$$S := \text{regress}(\Phi, S'h(\Phi), k) \quad A(t) := \text{interp}(S, \Phi, S'h(\Phi), t)$$

Маткад видає матрицю коефіцієнтів апроксимації, нижні три для трьох одночленів цієї функції

$$S = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ -2.596 \\ -0.062 \\ 3.237 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Тоді апроксимуюча функція має вигляд: $Sh'(\Phi) = -2.596 - 0.062\Phi - 3.237 \times 10^{-4} \cdot \Phi^2$

Рис. 2.30 – Апроксимація функції $S'_H(\Phi)$ методом регресії у MathCAD

Аналогічним способом, як показано на Рис. 2.30, було апроксимовано функцію $S_H(\Phi)$ та побудовано графіки за отриманими функціями, ознайомитись з якими можна у попередньому пункті даного розділу.

Висновки до розділу

Результати моделювання, отримані в середовищі Zemax для шести комерційних моделей варіолінз фірм Optotune та Varioptic, є фундаментальними для розуміння їхньої інженерної поведінки. Головним об'єктом аналізу була залежність положення передньої (S_H) та задньої (S'_H) головних точок від оптичної сили (Φ).

Ключовим висновком, який впливає з аналізу всіх апроксимаційних графіків, є те, що залежність положення головних точок від оптичної сили має практично лінійний характер у всьому робочому діапазоні кожної лінзи. Така лінійність має значне інженерне значення. Вона радикально спрощує інтеграцію цих варіолінз у складні оптичні системи. При нелінійній залежності інженерам довелося б використовувати складні табличні дані або поліноми високого порядку для калібрування фокусування. Натомість, отримані лінійні апроксимаційні функції $S_H(\Phi)$ та $S'_H(\Phi)$ дозволяють використовувати прості лінійні алгоритми в системі керування, забезпечуючи швидке та точне прогнозування положення головних

площин для будь-якого заданого значення оптичної сили. Це мінімізує обчислювальні витрати та підвищує надійність автоматизованого фокусування.

Що стосується напрямку залежності, результати для всіх шести моделей є узгодженими: збільшення оптичної сили Φ призводить до зменшення значень S_H та S'_H . Фізична інтерпретація цього явища полягає в тому, що при збільшенні фокусуєної здатності її головні точки зміщуються в бік того середовища, яке має менший показник заломлення.

Порівняльний аналіз між лінзами Optotune та Varioptic виявляє відмінності у чутливості або коефіцієнті нахилу отриманих лінійних залежностей. Цей нахил є мірою того, наскільки сильно зміщуються головні точки на одиницю зміни оптичної сили. Різниця в нахилі прямо пов'язана з різними фізичними принципами, на яких побудовані ці лінзи: Optotune використовує пружну мембрану та рідкий полімер, тоді як Varioptic базується на принципі електророзмочування. Відмінності у конструкції та матеріалах призводять до різної внутрішньої механічної чи електричної реакції на керуючий сигнал, що, своєю чергою, визначає їхню кінематику та динаміку зміщення головних площин. Так з графіків наведених у попередньому пункті можемо побачити, що варіолінзи від компанії Optotune є більш чутливими у даному аспекті в порівнянні з варіолінзами Varioptic.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ТРАНСФОКАТОРА З ЗУМ-АФОКАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ ГАЛІЛЕЯ ПОБУДОВАНОЇ НА НЕРУХОМИХ ВАРІОЛІНЗАХ

3.1 Мета та завдання розділу

Мета: Метою розділу є перевірка ефекту від використання результатів Розділу 2 при створенні трансфокатора з афокальною системою Галілея на базі нерухомих варіолінз ML-20-37.

Завдання розділу:

1. Комп'ютерне моделювання оптичної системи трансфокатора без урахування руху кардинальних точок варіолінз
2. Розрахунок діаметрів спот-діаграм зображення осьової точки, сформованих моделлю трансфокатора без урахування зсувів головних точок.
3. Моделювання оптичної системи трансфокатора з урахуванням руху кардинальних точок варіолінз
4. Аналіз діаметрів спот-діаграм зображення осьової точки, сформованих моделлю трансфокатором, в якій враховано зсув головних точок.

3.2 Метод комп'ютерного моделювання трансфокатора

В Розділі 2 вказано на необхідність врахування зміни положення кардинальних точок варіолінз, вбудованих в оптичну зум-систему. Зміна оптичної сили варіо-компонентів викликає зміщення їхніх головних площин. Ігнорування цього фактору може призводити до порушення умови афокальності з появою дефокусування зображення, сформованого трансфокатором.

Тому в даному пункті розділу представлено алгоритм складання та розв'язку системи рівнянь, що описує взаємозв'язок між кутовим збільшенням системи Галілея та оптичними силами її компонентів з урахуванням руху головних точок варіолінз. Це дозволяє отримати аналітичні вирази для керування параметрами системи в реальному часі.

3.2.1 Розрахунки значень оптичних сил варіо-компонентів системи Галілея залежних від кутового збільшення афокальної системи з урахуванням осьових зсувів головних точок варіо-компонентів

Відповідно до завдання на дипломну роботу, одним із ключових етапів дослідження є моделювання афокальної системи галілеєвського типу для заданого трансфокатора з урахуванням виявлених рухів головних точок. Виконання цього завдання необхідне для перевірки розробленого методу синтезу та підтвердження стабільності положення площини зображення при зміні збільшення.

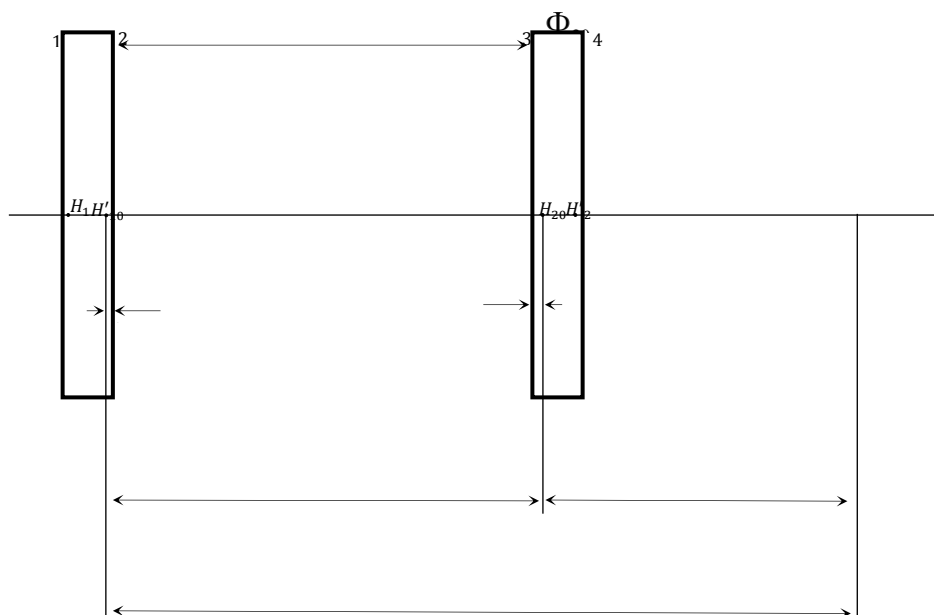


Рис. 3.1 – Оптична схема афокальної системи Галілея

З Рис. 3.1 Φ_{10} , Φ_{20} - оптичні сили при $\gamma = \gamma_0$. При цьому відстань між Задньою головною площиною варіо-компонента 1 та передньою головною площиною варіо-компонента 2 розраховано з умов, що оптичні сили відносяться як:

$$\gamma_0 = -\frac{\Phi_{20}(\gamma_0)}{\Phi_{10}(\gamma_0)} \quad (1)$$

$$f'_1(\gamma_0) + f'_2(\gamma_0) = \frac{1}{\Phi_1(\gamma_0)} + \frac{1}{\Phi_2(\gamma_0)} = L_0 \quad (2)$$

З виразів (1) та (2) маємо:

$$\Phi_1(\gamma_0) = \frac{1000(\gamma_0 - 1)}{\gamma_0 L_0} \quad (3)$$

$$\Phi_2(\gamma_0) = \frac{1000(1-\gamma_0)}{L_0} \quad (4)$$

Також з Рис. 3.1 бачимо, що відстань між головними площинами варіолінз:

$$-S'_{10H'} + d + S_{20H} = L_0 \quad (5)$$

Звідки:

$$d = L_0 + S'_{10H'} - S_{20H} \quad (6)$$

При переході на інше поточне значення кутового збільшення γ оптичні сили обох компонентів змінюються і відповідно дають $\Phi_1(\gamma)$ та $\Phi_2(\gamma)$, де γ - нове значення кутового збільшення. Але при переході на нові значення оптичних сил змінюються також і відрізки $S'_{1H'}$ та S_{2H} . Вони є залежними від оптичних сил, тобто:

$$S'_{1H'} = S'_{1H'}(\Phi_1) \quad (7)$$

$$S_{2H} = S_{2H}(\Phi_2) \quad (8)$$

Якщо для пошуку нових значень Φ_1 і Φ_2 використовувати вирази (3) та (4), то вони не дадуть правильних значень $\Phi_1(\gamma)$ і $\Phi_2(\gamma)$, оскільки при таких значення змінюються відрізки $S'_{1H'}$ та S_{2H} , а відстань d змінюватись не має. Через це задні фокуси обох варіолінз не будуть суміщеними і як наслідок система втратить афокальність, що є недопустим.

Тоді для забезпечення афокальності потрібно виконати умову:

$$-S'_{1H'}(\Phi_1) + d + S_{2H}(\Phi_2) = f'_1 + f'_2 = \frac{1}{\Phi_1} + \frac{1}{\Phi_2} \quad (9)$$

До рівняння (9) додається ще одна умова, пов'язана з кутовим збільшенням γ :

$$\gamma = -\frac{\Phi_2(\gamma)}{\Phi_1(\gamma)} \quad (10)$$

З результатів досліджень функцій $S_H(\Phi)$ та $S_{H'}(\Phi)$ варіолінзи, проведених у розділі 2, витікає, що вони достатньо точно апроксимуються виразами:

$$S_H(\Phi) = S_H(\Phi_0) + k_H \Phi \quad (11)$$

$$S_{H'}(\Phi) = S_{H'}(\Phi_0) + k_{H'} \Phi \quad (12)$$

Враховуючи дані умови, рівняння (9) набуде вигляду:

$$-S'_{1H'}(\Phi_0) + k_{H'}\Phi_1 + d + S_{2H}(\Phi_0) + k_H\Phi_2 = \frac{1}{\Phi_1} + \frac{1}{\Phi_2} \quad (13)$$

Рівняння (13) разом з виразом (10) складають систему, в якій Φ_1 і Φ_2 є невідомими. Розв'язок цієї системи для кожного конкретного значення γ дозволяє отримати сукупність даних для апроксимації функцій $\Phi_1(\gamma)$ і $\Phi_2(\gamma)$, які дозволяють зберігати систему Галілея афокальною з урахуванням руху головних точок варіолінз.

Наступним кроком, був розв'язок отриманої системи рівнянь. Для вирішення цієї задачі було використано середовище MathCAD, за допомогою функцій якого було знайдено значення оптичних сил першого та другого варіо-компонентів системи, при різних значеннях кутового збільшення. Приклад розрахунків наведено на Рис. 3.2, отримані значення наведено у Табл. 3.1.

Чисельний Розв'язок системи рівнянь

Given $\gamma := 1.5$

$$(1000) \cdot (\gamma - 1) - \Phi_1 \cdot \gamma \cdot (169.4759 + 0.0645 \cdot \Phi_1 - 0.1352 \cdot \Phi_2) = 0$$

$$1000 \cdot (1 - \gamma) - \Phi_2 \cdot (169.4759 + 0.0645 \cdot \Phi_1 - 0.1352 \cdot \Phi_2) = 0$$

Find(Φ_1, Φ_2) \rightarrow $\begin{pmatrix} 1.9607841108094861015 & -635.98959069517162602 \\ -2.9411761662142291522 & 953.98438604275743903 \end{pmatrix}$

$\Phi_1 := 1.9607841108094861015$ $\Phi_2 := -2.9411761662142291522$

$f_1 := \frac{1000}{\Phi_1}$ $f_2 := \frac{1000}{\Phi_2}$

$f_1 = 510$ $f_2 = -340$

При цих оптичних силах варіолінз дійсна відстань між їх головними точками

$$L := 169.4759 + 0.0645 \cdot \Phi_1 - 0.1352 \cdot \Phi_2$$

$L = 170$

Рис. 3.2 – Розрахунок оптичних сил варіолінз у середовищі MathCAD

Таблиця 3.1 Оптичні сили варіолінз ML-20-37 при зміні значень кутового збільшення γ , з урахуванням зміщення головних точок

γ	Φ_1	f_1	Φ_2	f_2	$L(\gamma)$
1.5	1.96078	510	-2.94117	-340	170
2	2.93327	340.917	-5.86654	-170.458	170.459
2.5	3.51105	284.815	-8.77762	-113.926	170.889
3	3.89168	256.958	-11.67506	-85.653	171.305
3.5	4.15977	240.398	-14.55921	-68.685	171.713
4	4.35759	229.485	-17.43035	-57.371	172.114

Аналогічним методом було розраховано значення оптичних сил варіолінз, у системі Галілея, без урахування руху головних точок, результат розрахунків наведено у Табл. 3.2.

Таблиця 3.2 Оптичні сили варіолінз ML-20-37 при зміні значень кутового збільшення γ , без урахування зміщення головних точок

γ	Φ_1	f_1	Φ_2	f_2	$L(\gamma)$
1.5	1.96078	510	-2.94118	-340	170
2	2.94118	340	-5.88235	-170	170
2.5	3.52941	283.333	-8.83453	-113.333	170
3	3.92157	255	-11.76471	-85	170
3.5	4.20168	238	-14.70588	-68	170
4	4.41176	226.665	-17.64706	-56.667	170

Згідно знайдених значень у Таблиці 3.1, були знайдено значення функцій $\Phi_1(\gamma)$ і $\Phi_2(\gamma)$ та побудовано графіки даних залежностей, які наведені на Рис. 3.3 - 3.4

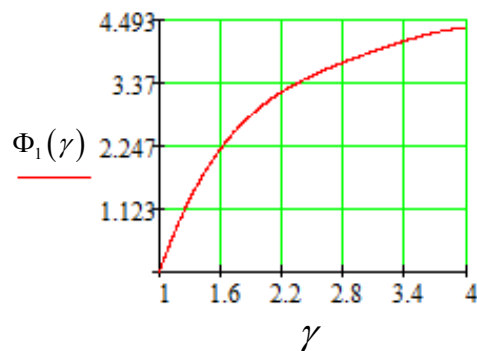


Рис. 3.3 – Графік апроксимованої функції $\Phi_1(\gamma)$

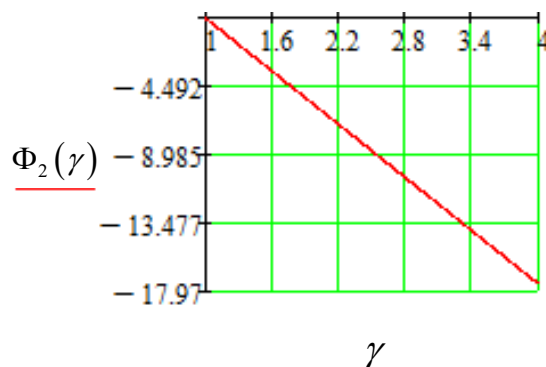


Рис. 3.4 – Графік апроксимованої функції $\Phi_2(\gamma)$

Отримані апроксимовані функції $\Phi_1(\gamma)$ та $\Phi_2(\gamma)$:

$$\Phi_1(\gamma) = -9.32 + 14.639\gamma - 6.606\gamma^2 + 1.406\gamma^3 - 0.114\gamma^4$$

$$\Phi_2(\gamma) = 5.774 - 5.81\gamma$$

3.2.2 Розрахунки діаметрів спот-діаграм зображення осьової точки, сформованих трансфокатором без урахування зсувів головних точок варіолінз

Перед проведенням синтезу компенсуючої схеми доцільно дослідити поведінку оптичної системи при ігноруванні фізичного зміщення головних площин варіо-компонентів.

Для цього було змодельовано роботу трансфокатора, де варіолінзи розглядалися як компоненти зі змінною оптичною силою, але уявно нерухомими головними точками. Аналіз Spot-діаграм такої системи дозволяє наочно продемонструвати при цьому явище дефокусування зображення та підтвердити положення про недопустимість ігнорування цього ефекту.

На Рис. 3.5 – 3.6 продемонстровано вікно середовища програми Zemax з конструктивними параметрами оптичної системи трансфокатора без урахуванням зсуву головних точок.

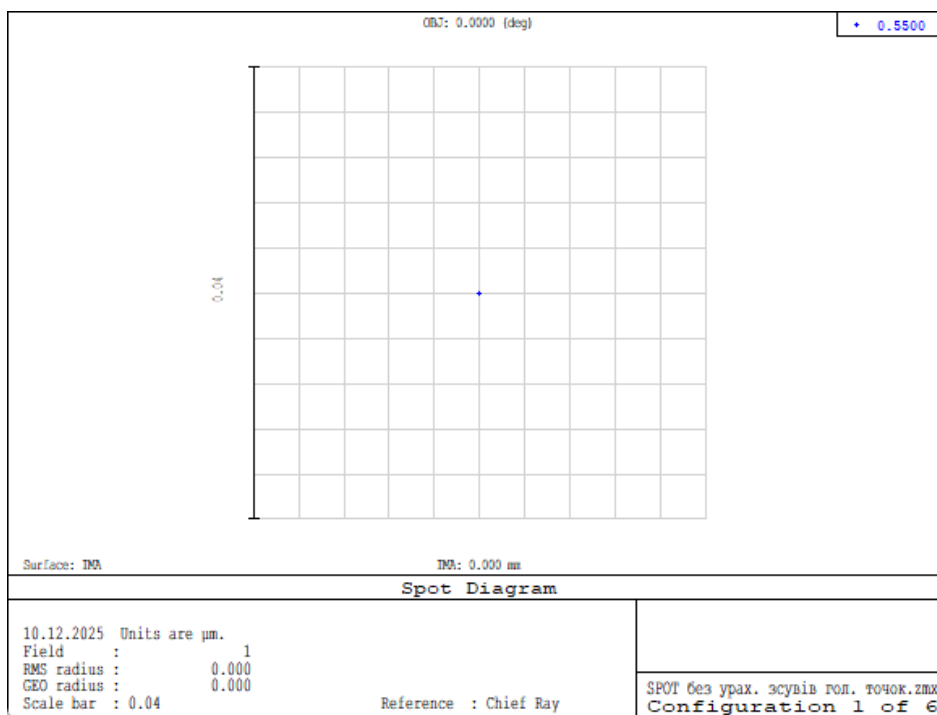
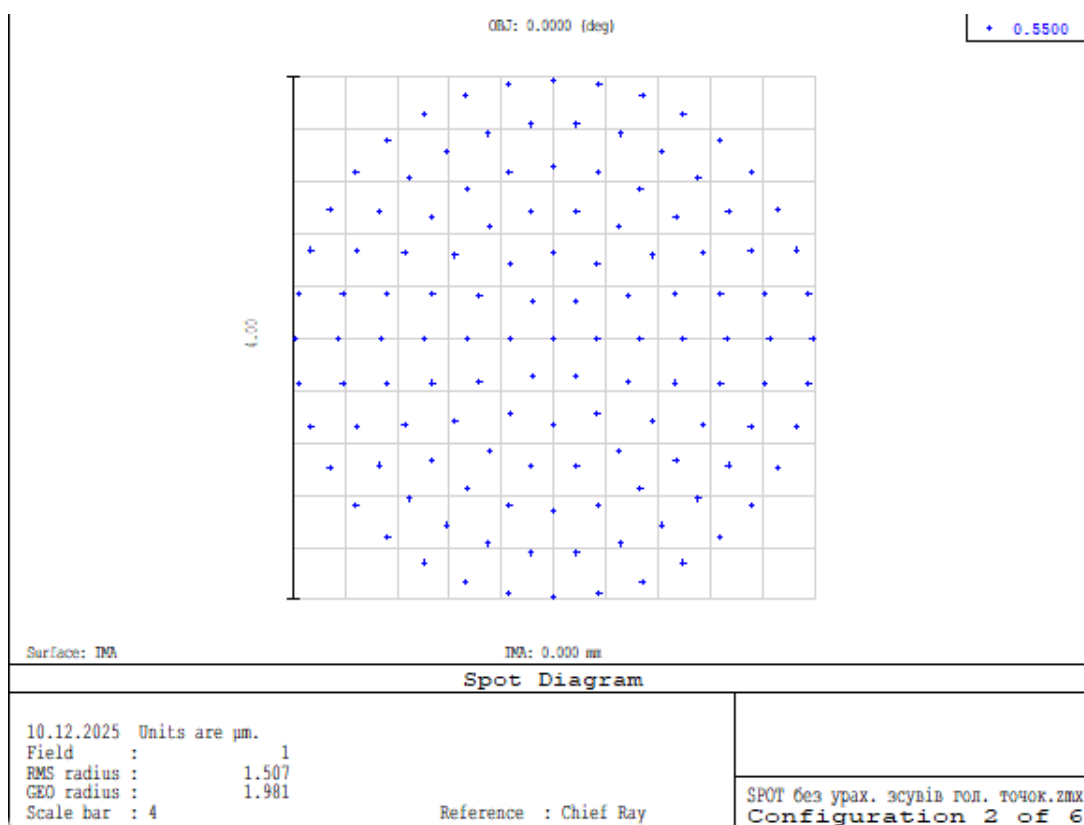
На Рис. 3.7 – 3.12 продемонстровано отримані Spot-діаграми такої системи для усього діапазону збільшення.

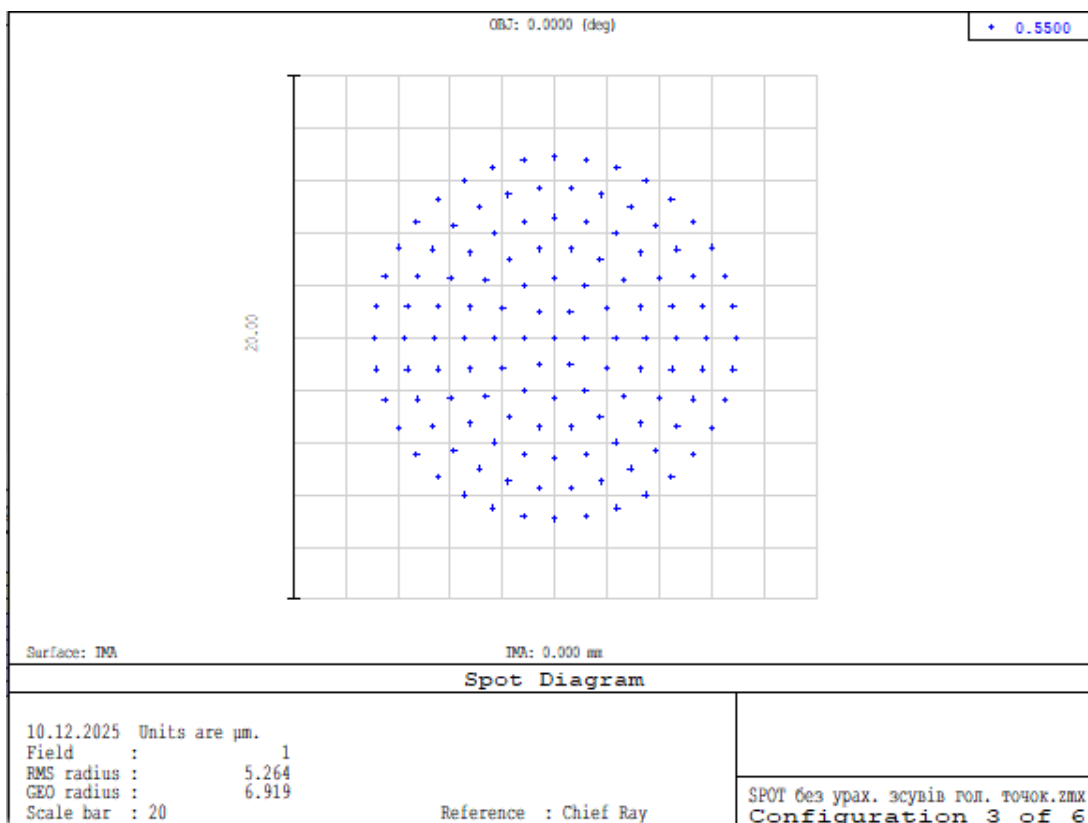
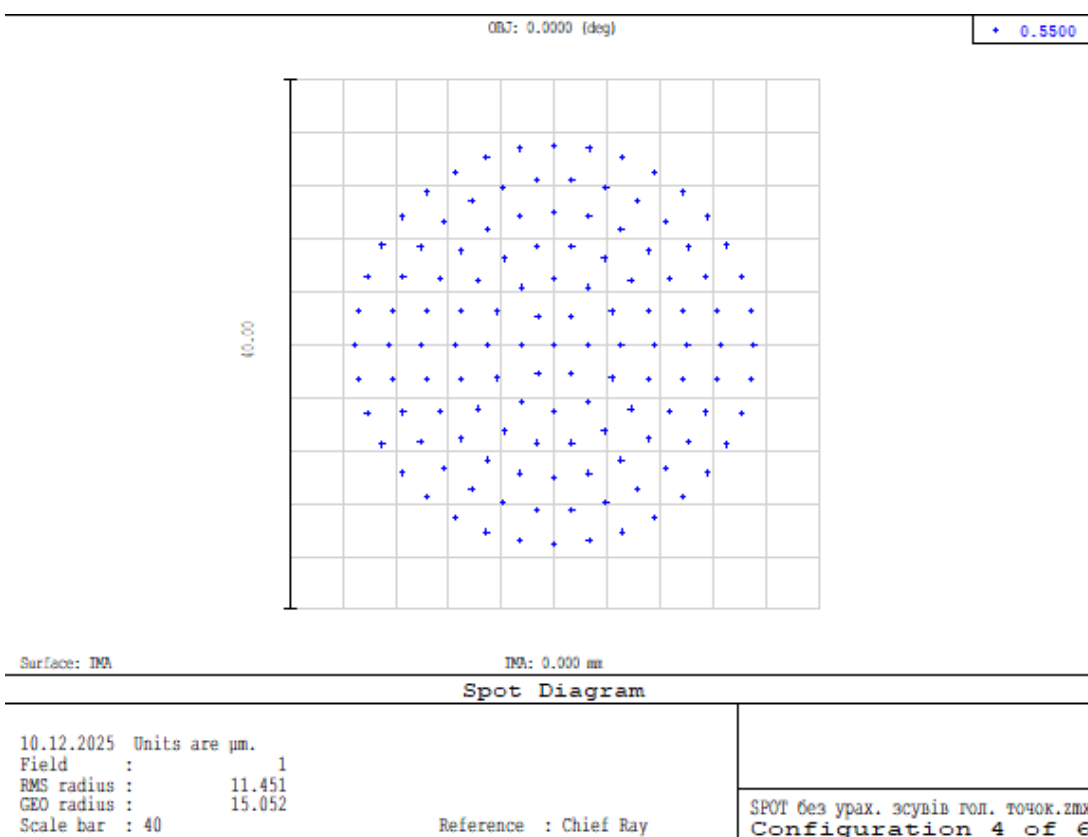
Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0 (unused)	Par 1 (unused)
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000	0.000		
STO	Standard	Infinity	0.000		10.000	0.000		
2	Paraxial		170.000		10.000			283.333
3	Paraxial		5.000		4.000			-113.333
4	Paraxial		25.000		4.000			25.000
IMA	Standard	Infinity	-		2.336E-006	0.000		

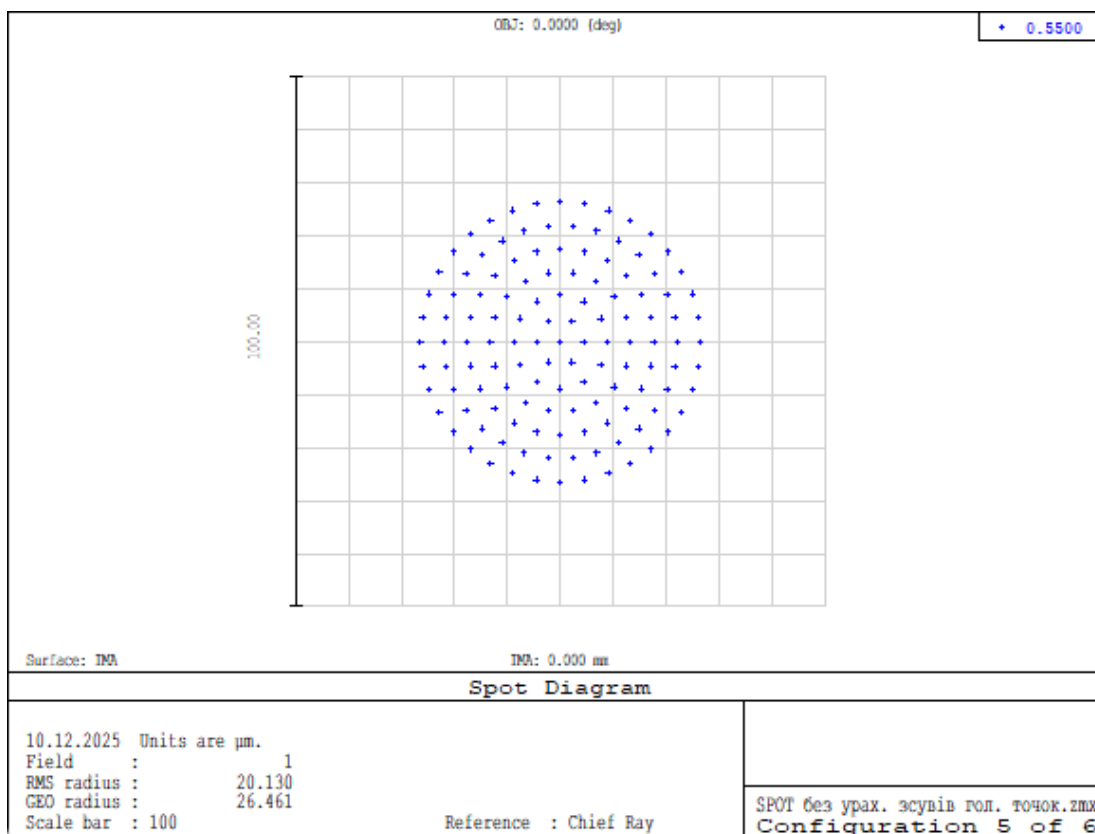
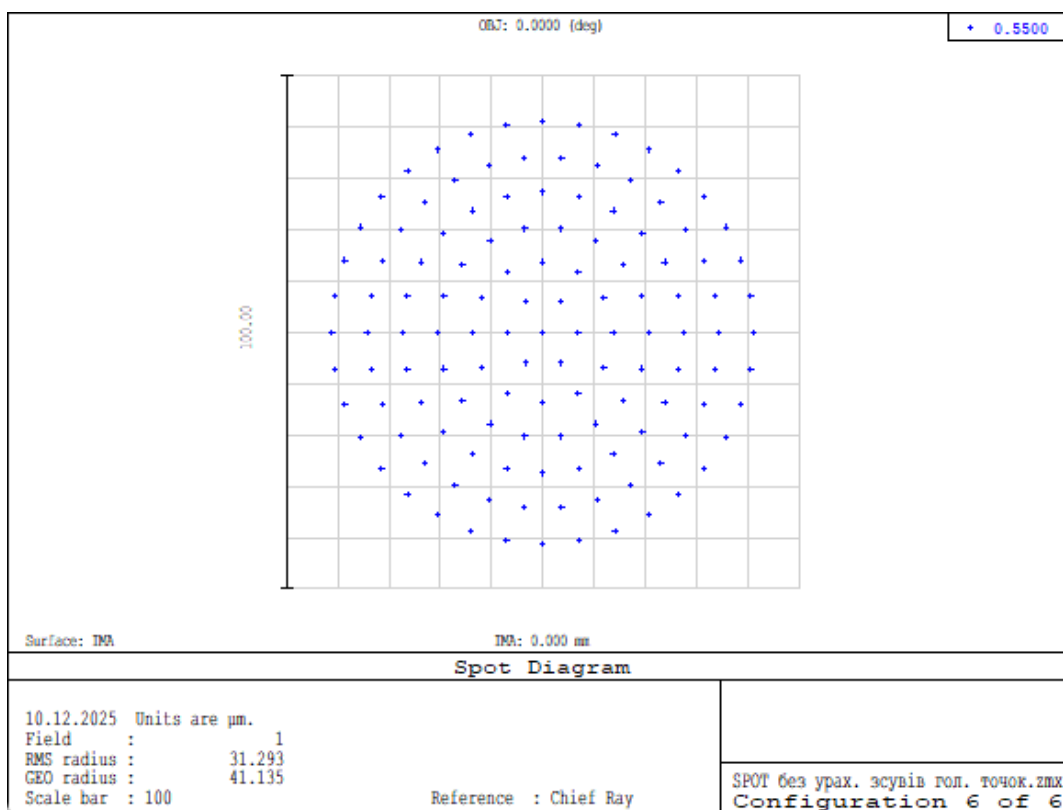
Рис. 3.5 – Параметри трансфокатора без урахуванням зсуву головних точок

Active : 3/6	Config 1	Config 2	Config 3*	Config 4	Config 5	Config 6
1: MOFF	0	1.5	2.0	2.5	3.0	4
2: THIC	2	170.000	170.000	170.000	170.000	170.000
3: PRAM	2/1	510.000	340.000	283.333	255.000	226.667
4: PRAM	3/1	-340.000	-170.000	-113.333	-85.000	-56.666

Рис. 3.6 – Мультиконфігурація для трансфокатора без урахуванням зсуву головних точок

Рис. 3.7 – Spot діаграма при $\gamma = 1.5$ Рис. 3.8 – Spot діаграма при $\gamma = 2$

Рис. 3.9 – Spot діаграма при $\gamma = 2.5$ Рис. 3.10 – Spot діаграма при $\gamma = 3$

Рис. 3.11 – Spot діаграма при $\gamma = 3.5$ Рис. 3.12 – Spot діаграма при $\gamma = 4$

Результати моделювання роботи системи в режимі ігнорування фізичного зміщення головних площин варіолінз демонструють суттєве дефокусування зображення осьової точки. Аналіз отриманих Spot-діаграм у діапазоні зміни кутового збільшення від 1.5 до 4 виявив чітку тенденцію до зростання дефокусування. Графік залежності діаметру абераційної плями від значення γ наведено на Рис. 3.13.

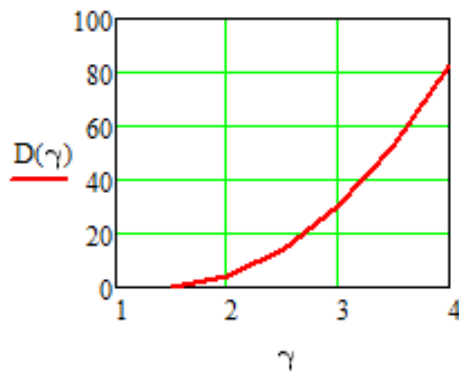


Рис. 3.13. – Графік залежності діаметру абераційної плями від значення γ

Отримане значення діаметру абераційної плями значно перевищує звичайні розміри пікселя типових сучасних матричних фотоприймачів. Це підтверджує, що ігнорування ефекту руху головних точок при проєктуванні не тільки трансфокаторів, але й інших оптичних систем, де використовуються варіолінзи, є недопустимим, оскільки призводить до суттєвої втрати різкості зображення.

3.2.3 Розрахунки діаметрів спот-діаграм зображення осьової точки, сформованих трансфокатором з урахуванням зсувів головних точок варіолінз

Кінцевим етапом перевірки якості зображення синтезованої оптичної системи трансфокатора є його абераційний аналіз. Оскільки в системі використовуються варіо-компоненти, зміна оптичної сили яких супроводжується осьовим зміщенням головних точок вздовж оптичної осі, необхідно оцінити вплив цього фактору на якість фокусування.

Моделювання системи здійснювалося в середовищі програми Zemax з використанням ідеальних параксіальних компонентів. Такий підхід дозволяє виключити вплив геометричних аберацій, властивих реальним компонентам, і ізольовано дослідити саме внесок зсуву головних точок у дефокусування зображення.

Синтезована оптична схема складається з афокальної насадки на базі двох варіюлінз та третього нерухомого компонента (фікс-групи), який моделює об'єктив із фокусною відстанню $f = 25 \text{ мм}$. Для проведення розрахунків було створено мультиконфігурацію системи, що описує різні стани трансфокатора відповідно до значень оптичних сил, розрахованих у попередньому розділі.

При аналізі критерієм якості зображення було обрано розміри Spot-діаграм зображення осьової точки. Цей метод у рамках параксіальної моделі дозволяє однозначно визначити геометричний радіус абераційної плями, від дефокусування.

На Рис. 3.14 – 3.15 продемонстровано вікно середовища програми Zemax з конструктивними параметрами оптичної системи трансфокатора з урахуванням зсуву ГОЛОВНИХ ТОЧОК.

Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0 (unused)	Par 1 (unused)	Par 2 (unused)
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000	0.000			
STO	Standard	Infinity	0.000		10.000	0.000			
2	Paraxial		171.305		10.000			256.958	1
3	Paraxial		5.000		3.333			-85.653	0
4	Paraxial		25.000		3.333			25.000	1
IMA	Standard	Infinity	-		4.441E-016	0.000			

Рис. 3.14 – Параметри трансфокатора з урахуванням зсуву головних точок

Active : 4/6	Config 1	Config 2	Config 3	Config 4*	Config 5	Config 6
1: MOFF	0	1.5	2.0	2.5	3.0	4
2: THIC	2	170.000	170.458	170.889	171.305	171.713
3: PRAM	2/1	510.000	340.917	284.815	256.958	240.398
4: PRAM	3/1	-340.000	-170.458	-113.926	-85.653	-68.685
						-57.371

Рис. 3.15 – Мультиконфігурація для трансфокатора з урахуванням зсуву головних ТОЧОК

На Рис. 3.16 наведена Spot діаграма тільки для $\gamma = 3$, тому що при всіх інших значеннях γ у всьому його робочому діапазоні картина спот-діаграми залишалася такою самою.

Наведене переконливо підтверджує зникнення дефокусування зображення при умові врахування рухів кардинальних точок варіюлінз, що супроводжують зміну їх оптичних сил. Цим підтверджується позитивний ефект від використання результатів досліджень, проведених у Розділі 2, при виконанні габаритного розрахунку афокальної системи, побудованої на варіюлінзах.

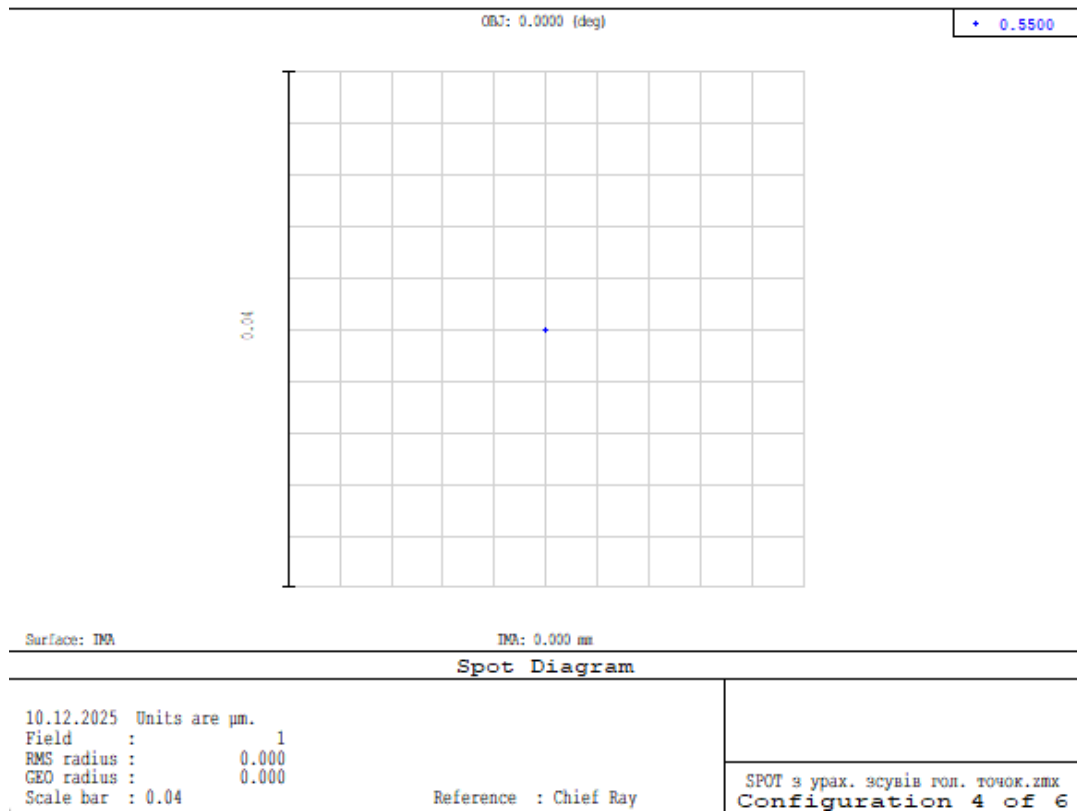


Рис. 3.16 – Spot діаграма при $\gamma = 3$

Висновки до розділу

1. У даному розділі доведено про шкідливий вплив зміни положення головних точок варіолінз на дефокусування зображення осьової точки, сформованої оптичною системою трансфокатора, якщо цей вплив ігнорується.

2. Результати моделювання трансфокатора з повним урахуванням зсуву головних точок варіолінз показали, що розроблена в такий спосіб оптична система забезпечує запобігання дефокусування зображень у всьому діапазоні зміни кутового збільшення афокальної системи на варіолінзах від $\gamma = 1.5$ до $\gamma = 4$.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІЙ ТРАНСФОКАТОР НА ВАРІОЛІНЗАХ»

Четвертий розділ фокусується на всебічній економічній оцінці та дослідженні комерційних перспектив створення комп'ютерно-інтегрованого трансфокатора на базі варіолінз у межах стартап-проєкту. З огляду на інтенсивну динаміку галузі машинного зору, підвищення стандартів швидкодії оптичних систем та глобальний тренд на автоматизацію виробництва, ключовим викликом стає перетворення лабораторного прототипу на повноцінний ринковий продукт.

У даній частині роботи досліджено конкурентний ландшафт, виокремлено пріоритетні групи споживачів, а також сформульовано стратегію виходу на ринок та бізнес-модель. Окрім цього, наведено розрахунки основних фінансових індикаторів, які свідчать про інвестиційну привабливість розробки та підтверджують доцільність її серійного впровадження..

4.1 Опис технології та технологічний аудит ідеї проєкту

Опираючись на розглянуті у попередніх розділах технічні аспекти проєктування адаптивних оптичних зум-систем та специфіці керування фокусною відстанню за допомогою рідинних елементів, даний розділ присвячено маркетинговому дослідженню стартап-проєкту. Метою цього аналізу є обґрунтування комерційної привабливості розробленого комп'ютерно-інтегрованого трансфокатора, оцінка його ринкового потенціалу порівняно з традиційною механічною оптикою та визначення оптимальної ніші в секторі компонентів для технічного зору.

В основі концепції проєкту лежить ідея створення швидкодіючого оптичного модуля, що здійснює масштабування та фокусування зображення без фізичного переміщення лінз — виключно за рахунок зміни кривизни варіолінз під дією електричного струму. Глибока інтеграція з цифровими керуючими платформами забезпечує системі миттєвий відгук (на рівні мілісекунд), абсолютну нечутливість до вібраційних навантажень та високу експлуатаційну надійність, що вигідно вирізняє її на тлі класичних моторизованих об'єктивів. Завдяки впровадженню спеціалізованих алгоритмів стабілізації та температурної компенсації, пристрій здатний ефективно

вирішувати складні задачі в сферах промислової дефектоскопії, навігації БПЛА та мобільної робототехніки.

Актуальність впровадження такої розробки підсилюється стрімким зростанням вітчизняного сектору Defense Tech та загальним трендом на автоматизацію виробничих процесів. На ринку сформувався стійкий запит на високотехнологічні компоненти подвійного призначення, які поєднують функціональність із витривалістю в жорстких умовах. Запропоноване рішення виступає як ефективна альтернатива імпортованим аналогам, пропонуючи споживачу незалежність від складної міжнародної логістики та адаптивність під конкретні технічні завдання.

Ключовим вектором стратегії розвитку обрано тісну кооперацію з розробниками безпілотних систем, наземних роботів та інтеграторами охоронних комплексів. Співпраця з профільними підприємствами дозволить верифікувати технічні характеристики трансфокатора в реальних умовах експлуатації, доопрацювати програмну складову під потреби замовника та забезпечити перехід від дослідного зразка до серійного продукту.

У таблиці 5.1 систематизовано зміст бізнес-ідеї та окреслено потенційні ринкові сегменти для подальшого аналізу цільової аудиторії.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проєкту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Розробка комп'ютерно-інтегрованого трансфокатора на базі варіолінз. Створення оптичної системи, де зміна масштабу та фокусування	1. Системи машинного зору (Machine Vision) на автоматизованих лініях	Висока швидкодія фокусування (10–20 мс)
	2. Оптичні модулі для БПЛА та мобільної робототехніки	Абсолютна стійкість до вібрацій та ударів

відбуваються програмно, шляхом зміни кривизни рідинної лінзи, без використання механічних рухомих частин.	3. Інтелектуальні системи відеоспостереження та безпеки	Довговічність (ресурс > 1 млрд циклів) та компактність конструкції
---	---	--

Запропонований комп'ютерно-інтегрований трансфокатор суттєво відрізняється від існуючих оптичних систем унікальним поєднанням надвисокої швидкодії (10–20 мс) та експлуатаційної витривалості, що є недосяжним для традиційних моторизованих об'єктивів. На відміну від механічних аналогів, які страждають від інерційності та зносу рухомих частин, дана розробка базується на технології зміни кривизни рідинної лінзи, що забезпечує абсолютну стійкість до вібраційних навантажень.

Завдяки використанню прецизійних драйверів керування та алгоритмів температурної компенсації гарантується стабільність оптичних характеристик та ресурс роботи, що перевищує 1 мільярд циклів перемикавання. Крім того, інтегрований програмний комплекс дозволяє реалізувати функції миттєвого автофокусу та супроводу швидкісних об'єктів у реальному часі, роблячи систему значно ефективнішою за інерційні механічні зуми, а її енергоефективність та компактність надають вагомі переваги при інтеграції в мобільні платформи.

Для визначення конкурентоспроможності розроблюваного трансфокатора на базі варіолінз проведено порівняльний аналіз із існуючими ринковими аналогами. Головною технічною перевагою пропонованого пристрою є відмова від механічного переміщення лінз уздовж оптичної осі. У класичних системах це реалізується за допомогою складних кулачкових механізмів та електромоторів, які мають значну інерцію, споживають багато енергії та схильні до механічного зносу. Натомість, використання ефекту електрозміщення (або полімерних мембран) у варіолінзах дозволяє досягти зміни фокусної відстані за час, що вимірюється мілісекундами.

Економічна доцільність проєкту базується на значному збільшенні життєвого циклу обладнання. Якщо механічні трансфокатори мають обмежений ресурс, то варіолінзи здатні витримувати мільярди циклів перемикавання без деградації

характеристик. Це дозволяє знизити витрати на обслуговування та заміну оптики, особливо у промислових системах безперервної дії та у важкодоступних місцях.

Основними конкурентами для трансфокатора на варіолінзах є:

1. Класичні механічні зум-об'єктиви (стандартна оптика з моторчиками)
2. Системи з кількома фіксованими камерами (як у сучасних смартфонах або турельних системах на дронах, де перемикаються між ширококутною та вузькокутною камерою)
3. Цифровий зум (програмне збільшення, яке просто обрізає картинку).

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї стартап проєкту наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2. *Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту*

№ n/n	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	<i>(потенційні) товари/концепції конкурентів</i>				<i>W</i> (слаб ка сторо на)	<i>N</i> (нейтр альна сторон а)	<i>S</i> (сильн а сторо на)
		<i>Мій проєкт</i>	<i>Конкурен т1</i>	<i>Конкуре нт2</i>	<i>Конку- рент3</i>			
1.	Швидкодія	10–20 мс	> 500 мс	100– 300 мс	0 мс			S
2.	Ресурс роботи	> 1 млрд циклів	~ 300 тис. циклів	Високи й	Необме жений		N	
3.	Якість зображенн я	Висока	Дуже висока	Висока	Низька		N	
4.	Енергоспо живання	Низьке	Високе	Середн є	Мінімал ьне			S
5.	Стійкість до вібрацій	Висока	Низька	Висока	Абсолю тна			S

6.	Габарити та вага	Компактний	Громіздкий	Громіздкий	Найменші			S
7.	Вартість	Середня /Висока	Середня	Висока	Безкоштовно	W		

Аналіз даних таблиці 4.2 підтверджує, що ключовими перевагами розробки є надвисока швидкодія та абсолютна вібростійкість, що вигідно вирізняє її серед інерційних механічних аналогів. Хоча вартість виробу є вищою за бюджетні рішення (слабка сторона), це нівелюється компактністю, низьким енергоспоживанням та відсутністю витрат на обслуговування механіки. За сукупністю характеристик трансфокатор є висококонкурентним продуктом для ринку БПЛА та робототехніки.

Для підтвердження можливості фізичної реалізації задуму далі проведено технологічний аудит, результати якого наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Зміна фокусної відстані без механіки	Технологія електрокапілярних або еластомерно мембранних варіолінз	Наявні на ринку	Доступні
2.	Апаратне керування кривизною лінзи	Мікроконтролери (STM32/ESP32) + Прецизійні драйвери струму (12-bit DAC) + Датчики температури	Наявні на ринку	Доступні

3.	Алгоритмічна стабілізація та автофокус	C/C++ (Embedded), PID-регулятори, Алгоритми температурної компенсації	Частково наявні, потребують програмної адаптації	Доступні
4.	Оптичне узгодження системи	Розрахунок афокальних систем (Zemax), використання стандартних скляних лінз та ахроматів	Наявні стандартні оптичні компоненти	Доступні
5.	Корпус	Високоточний 3D-друк (SLA/SLS) або CNC-обробка алюмінію	Наявні на ринку	Доступні
Обрані технології реалізації ідеї проєкту: комерційні варіолінзи + мікроконтролерне керування (STM32) + власні алгоритми стабілізації + корпус, виготовлений методом 3D-друку/CNC				

За результатами аналізу даних Таблиці 4.3 можна стверджувати, що ідея стартап-проєкту є цілком реальною для технічного втілення. Обрана стратегія базується на інтеграції вже існуючих на ринку апаратних компонентів (варіолінз, мікроконтролерів) із розробкою унікального програмного забезпечення. Такий підхід, що поєднує доступну елементну базу та авторські алгоритми керування, гарантує можливість створення високотехнологічного продукту без необхідності залучення надскладних виробничих ресурсів чи винайдення нових фізичних принципів.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для об'єктивної оцінки комерційних перспектив розробки необхідно ідентифікувати сприятливі ринкові фактори (можливості), що сприятимуть успішному виведенню продукту на ринок, а також спрогнозувати зовнішні ризики (загрози), які можуть ускладнити реалізацію стартапу. Першим кроком у цьому напрямку є детальне дослідження характеристик попиту на адаптивні оптичні системи, результати якого систематизовано в Таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ n/n	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	10–15
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	> 12 млрд \$ / рік
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стрімко зростає (Зростання зумовлене автоматизацією Industry 4.0, розвитком та масовим використанням БПЛА)
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі (Технологічні бар'єри: складність розробки драйверів керування; Патентні обмеження; Висока вартість R&D; Залежність від постачальників компонентів)
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Жорсткі (Стандарти EMVA 1288 для систем зору, ISO 9001, стандарти кріплень C-mount/CS-mount, військові стандарти)

		стійкості MIL-STD-810 для Defense Tech)
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30–50%

Результати оцінки ринкової кон'юнктури підтверджують високу інвестиційну привабливість сегменту оптичних компонентів для машинного зору та робототехніки. Галузь демонструє стійку висхідну динаміку, що стимулюється глобальними трендами Індустрії 4.0 та зростанням попиту на автономні безпілотні системи. Варто зазначити, що попри наявність високих вхідних бар'єрів (технологічна складність, жорсткі вимоги до стандартизації), вони відіграють роль захисного механізму, обмежуючи появу неякісних конкурентних рішень. Вагомим аргументом на користь запуску стартапу є значний рівень рентабельності в галузі (30–50%), що свідчить про спроможність проєкту генерувати високий прибуток за умови технологічної відповідності вимогам ринку.

Наступним кроком є ідентифікація та сегментація потенційних споживачів продукту, характеристики яких наведено в Таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1.	Автоматизація швидкісного контролю якості	Виробники систем машинного зору	Потреба у максимальній пропускній здатності конвеєра	Миттєве фокусування, високий ресурс циклів

2.	Отримання стабільного зображення в русі	Розробники БПЛА та мобільної робототехніки	Критичне ставлення до ваги, габаритів та енергоспоживання	Абсолютна вібростійкість, компактність, міцність
3.	Надійне цілодобове відеоспостереження	Інтегратори охоронних систем та спецтехніки	Орієнтація на обладнання, що не потребує частого обслуговування	Відсутність механічного зносу, робота в широкому діапазоні температур

Як свідчать дані Таблиці 4.5, основний попит на комп'ютерно-інтегровані трансфокатори формується у сегментах промислової автоматизації (Machine Vision), виробників БПЛА та інтеграторів систем безпеки. Для цих категорій споживачів визначальними критеріями вибору є миттєва швидкодія фокусування та стійкість оптичної системи до вібраційних навантажень. Специфіка вимог варіюється від прагнення максимізувати пропускну здатність конвеєрних ліній до потреби у мінімізації ваги та енергоспоживання на борту дронів. Попри галузеві відмінності, всі групи клієнтів зацікавлені у переході на довговічні рішення без рухомої механіки, що підтверджує значний ринковий потенціал розробки.

Разом з тим, впровадження даної технології супроводжується певними зовнішніми ризиками, які систематизовано в Таблиці 4.6.

.Таблиця 4.6. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Дешеві механічні аналоги	Демпінг цін з боку китайських виробників класичної оптики	Ставка на унікальні характеристики, яких немає у дешевих аналогів

2.	Технології-замінники	Розвиток цифрового зуму з AI-обробкою, що знижує потребу в оптиці	Постійне вдосконалення алгоритмів чіткості; акцент на фізичній перевазі оптичного збільшення
3.	Залежність від постачальників	Зрив поставок імпорتنних варіолінз або зміна цін	Формування складського запасу критичних компонентів; пошук альтернативних каналів логістики
4.	Патентні ризики	Можливі претензії власників патентів на технологію рідинних лінз	Патентування власних унікальних драйверів та алгоритмів керування, а не фізики лінзи
5.	Вимоги до сертифікації	Складність проходження сертифікації за військовими стандартами	Проведення попередніх полігонних випробувань; підготовка технічної документації згідно зі стандартами

Як впливає з Таблиці 4.6, реалізація проекту відбуватиметься в умовах насиченого конкурентного середовища, де основними викликами є ціновий тиск з боку виробників традиційної механічної оптики та залежність від закордонних постачальників компонентів. Водночас, ідентифіковані ризики не є критичними: загроза з боку дешевих аналогів нівелюється унікальними технічними характеристиками системи (швидкодією та вібростійкістю), а логістичні ризики мінімізуються шляхом формування складських запасів та диверсифікації каналів постачання. Це підтверджує здатність стартапу ефективно функціонувати на ринку за умови дотримання обраної стратегії захисту інтелектуальної власності та контролю якості.

Поряд із наявними ризиками, ринкове середовище створює низку сприятливих можливостей, які систематизовано в Таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Бум на ринку БПЛА та робототехніки	Критична потреба у вібростійких камерах для дронів та наземних платформ	Налагодження партнерства з виробниками дронів
2.	Розвиток кластеру Defense Tech	Доступ до державних грантів (Brave1) та менторської підтримки	Подання заявок на грантове фінансування R&D та масштабування
3.	Тренд на автоматизацію	Зростання попиту на швидкісний машинний зір на виробництвах	Розробка універсальних SDK для швидкої інтеграції в конвеєрні лінії
4.	Політика імпортозаміщення	Пріоритет вітчизняним виробникам у державних оборонних закупівлях	Отримання статусу критично важливого виробника, участь у тендерах
5.	Розвиток компонентної бази	Здешевлення та покращення характеристик рідинних лінз на світовому ринку	Зниження собівартості продукту, підвищення оптичної якості

Таким чином, результати аналізу зовнішніх можливостей підтверджують, що поточна ринкова кон'юнктура створює сприятливе підґрунтя для старту проєкту. Головними драйверами успіху виступають стрімке масштабування галузі безпілотних систем та державний пріоритет на розвиток оборонних технологій (Defense Tech).

Вагомим фактором також є глобальний запит на автоматизацію промисловості (Industry 4.0), що формує стійкий попит на швидкодіючу оптику. Реалізація цих шансів через участь у грантових програмах, стратегічні партнерства з виробниками дронів та орієнтацію на імпортозаміщення дозволить мінімізувати ризики та прискорити комерціалізацію розробки.

Переходимо до подальшого дослідження ринкового середовища. Щоб чітко окреслити умови функціонування проєкту та правила гри в галузі, проведено ступеневий аналіз конкуренції, результати якого наведено в Таблиці 4.8.

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції: олігополія	Ринок поділений між великими світовими брендами (Comptar, Tamron, Edmund Optics), які диктують стандарти якості та ціни.	Фокусування на унікальних властивостях (вібростійкість, швидкодія 20 мс), яких немає у масових виробників класичної оптики
2. Рівень конкурентної боротьби: світовий	Основні конкуренти — виробники з Японії, США, Китаю. Продукт конкурує на глобальному ринку компонентів, а не лише в Україні	Забезпечення сумісності інтерфейсів (C-mount, USB/GigE), наявність документації англійською мовою, отримання сертифікатів відповідності
3. Галузева ознака: міжгалузева	Конкуренція йде не лише з іншими об'єктивами, а й з	Демонстрація переваги оптичного зуму над

	альтернативними рішеннями: цифровим зумом, системами з декількома камерами	цифровим (збереження деталізації) та економічної вигоди над багатокамерними системами
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Споживач обирає між різними технологіями: механічний об'єктив (дешевший, але крихкий) або трансфокатор на варіолінзах (дорожчий, надійний)	Проведення порівняльних тестів ресурсу роботи, щоб довести економічну доцільність інвестиції в "незламну" оптику без механіки
5. Характер конкурентних переваг: нецінова	Покупці у секторі B2B та Defense Tech орієнтуються на надійність, стабільність роботи в екстремальних умовах та швидкість	Впровадження алгоритмів температурної стабілізації, розширеної гарантії та сервісної підтримки для інтеграторів
6. Інтенсивність: марочна	Інженери та замовники в оборонній сфері надають перевагу перевіреним брендам з репутацією (Carl Zeiss, Schneider, Tamron), оскільки ризик відмови обладнання є критичним	Активна маркетингова політика: участь у міжнародних виставках, публікація результатів краш-тестів, надання Demo-kit наборів для тестування клієнтами перед покупкою

Отже, результати ступеневого аналізу (Табл. 4.8) свідчать, що стартап виходить на глобальний олігополістичний ринок, де домінують відомі бренди. У таких умовах пряма цінова боротьба є безперспективною. Конкурентоспроможність проєкту забезпечується стратегією технологічної диференціації — пропозицією унікальних

переваг, які недосяжні для класичної механіки. Успіх залежатиме від здатності компанії сформувати репутацію надійного партнера та надати якісну сервісну підтримку.

Для глибокої оцінки привабливості галузі далі використано модель п'яти сил М. Портера. Цей інструмент дозволяє комплексно проаналізувати ринкову динаміку через вплив п'яти ключових чинників:

1. **Загроза нових учасників:** оцінка бар'єрів входу в галузь.
2. **Сила покупців:** здатність клієнтів впливати на умови угоди.
3. **Загроза товарів-замінників:** ризик заміщення продукту альтернативними технологіями.
4. **Сила постачальників:** ступінь залежності від виробників компонентів.
5. **Рівень конкуренції:** інтенсивність боротьби між діючими гравцями ринку.

. Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Складові аналізу</i>	Світові виробники промислової оптики (Computar, Tamron, Edmund Optics), що пропонують класичні моторизовані зум-об'єктиви.	Великі виробники дронів (DJI, Autel) або камер, які можуть відкрити власні R&D відділи для створення такої оптики	Виробники варіолінз (Optotune, Corning) та мікроконтролерів (STMicroelectronics). Мають високу силу через унікальність технології	Виробник и БПЛА, систем безпеки та інтегратори Machine Vision. Вимагають повної сумісності (API/SDK) та надійності.	1. Цифровий зум з AI-покращенням (Super Resolution). 2. Системи з кількома фіксованими камерами

Висновки:	Висока інтенсивність боротьби. Конкуренти мають сильні бренди та налагоджені канали збуту, але їхні рішення часто технологічно застарілі	Загроза середня. Вхідний бар'єр високий через необхідність вузькопрофільних знань у керуванні рідинними лінзами та патентуванні драйверів	Постачальники мають значний вплив, оскільки ринок якісних рідинних лінз є монополізованим	Клієнти мають середню силу впливу. Вони чутливі до ціни, але в пріоритет ставлять технічні характеристики	Замінники обмежують ціновий поріг, але не можуть повноцінно замінити оптичний зум на великих дистанціях, де потрібна висока деталізація
-----------	--	---	---	---	---

Аналіз конкурентних сил за Портером свідчить, що критичний вплив на проєкт мають постачальники (через обмежену кількість виробників рідинних лінз) та прямі конкуренти (світові бренди). Водночас, товари-замінники не становлять значної загрози у професійному секторі, оскільки не забезпечують необхідної якості зображення на відстані. Тож успіх стартапу можливий за умови чіткої диференціації — фокусуванні на ніші вібростійкої оптики, де класична механіка є неефективною.

На основі цього визначено ключові фактори конкурентоспроможності, які систематизовано в Таблиці 4.10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1.	Надвисока швидкодія	Критичний для систем наведення
2.	Вібростійкість	Визначальний фактор для БПЛА

3.	Експлуатаційний ресурс	Важливо для промислових об'єктів 24/7
4.	Програмна керованість	Наявність API/SDK дозволяє легко інтегрувати об'єктів у складні алгоритми
5.	Масо-габаритні показники	Критично для авіаційних носіїв

У таблиці 4.11 наведено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін нашого проекту у порівнянні з конкурентами.

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ n/ n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з FOCUS Компану						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Швидкодія системи	20							+
2.	Експлуатаційна надійність	18							+
3.	Стійкість до вібрацій	15							+
4.	Габаритні розміри	12						+	
5.	Легкість програмної інтеграції	14					+		
6.	Оптична роздільна здатність	16			+				
7.	Ціна	15		+					

Наступним кроком є проведення SWOT-аналізу, який дозволить систематизувати внутрішні сильні та слабкі сторони, а також зовнішні можливості та загрози.

Таблиця 4.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <p>Надвисока швидкодія фокусування (10–20 мс)</p> <p>Абсолютна вібростійкість (відсутність механіки)</p> <p>Експлуатаційний ресурс > 1 млрд циклів</p> <p>Програмна інтеграція (власний API/SDK)</p>	<p>Слабкі сторони:</p> <p>Висока собівартість компонентів (варіолінз)</p> <p>Залежність від імпортних постачальників (Optotune/Corning)</p> <p>Складність розробки драйверів керування</p>
<p>Можливості:</p> <p>Стрімкий ріст ринку БПЛА та Defense Tech</p> <p>Доступ до грантового фінансування</p> <p>Попит на автоматизацію Industry 4.0</p> <p>Імпортозаміщення в оборонній сфері</p>	<p>Загрози:</p> <p>Демпінг цін з боку виробників механічних аналогів</p> <p>Логістичні ризики та зриви постачання лінз</p> <p>Розвиток конкуруючих технологій</p> <p>Патентні спори з правовласниками технологій</p>

Результати проведеного SWOT-аналізу створюють підґрунтя для формування стратегічних альтернатив ринкової поведінки стартапу. Метою цього етапу є розробка сценаріїв, які дозволять максимально ефективно капіталізувати сильні сторони проекту для нейтралізації зовнішніх загроз, а також використати ринкові можливості для компенсації внутрішніх слабких місць. На основі перехресного зіставлення факторів розроблено перелік стратегічних альтернатив, які наведено в Таблиці 4.13.

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Прямі продажі B2B (компоненти)	Висока	3–6 місяців
2	ОЕМ-співпраця з виробниками БПЛА	Середня	6–12 місяців
3	Власна лінійка готових пристроїв	Висока	12–18 місяців

Аналіз запропонованих альтернатив свідчить, що найбільш раціональним сценарієм виходу на ринок є прямі продажі оптичних модулів у сегменті B2B. Цей шлях дозволяє мінімізувати час до отримання першого прибутку та не вимагає складної кастомізації продукту на старті. Водночас, стратегії OEM-партнерства з виробниками дронів та випуск власної лінійки смарт-камер є перспективними векторами довгострокового розвитку. Вони необхідні для капіталізації проєкту та масштабування бізнесу, проте їх реалізація потребує триваліших циклів випробувань та залучення додаткового інвестиційного ресурсу.

4.3. Розроблення ринкової стратегії проєкту

Першим кроком у створенні ринкової стратегії є визначення підходу до охоплення ринку, що включає опис цільових груп потенційних клієнтів. Аналіз наведено у Таблиці 4.14 нижче.

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів в сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
------------------	---	--	--	---	---------------------------------

1.	Виробники БПЛА та дронів	Висока	Високий	Середня	Середня (Потрібні успішні полігонні випробування)
2.	Інтегратори систем машинного зору	Середня	Високий	Висока	Складна
3.	Науково-дослідні лабораторії та НДІ	Висока	Низький	Низька	Проста

Які цільові групи обрано: Після аналізу характеристик цільових груп було прийнято рішення зосередитися на виробниках БПЛА та сегменті промислової автоматизації (Machine Vision). Саме ці сегменти демонструють найвищу платоспроможність та гостру технічну потребу у швидкодіючих, вібростійких трансфокаторах, яку не можуть задовольнити традиційні механічні аналоги. Науковий сегмент розглядається як додатковий для тестування технологій

Таким чином, концентрація зусиль на сегментах з критичною технічною потребою (виробники БПЛА та систем машинного зору) створює фундамент для динамічного масштабування бізнесу. Орієнтація на підготовленого споживача, який розуміє переваги технології, дозволить оптимізувати маркетингові витрати та пришвидшити вихід на точку беззбитковості. Для ефективного освоєння обраних ніш та закріплення конкурентних позицій розроблено базову стратегію розвитку, ключові компоненти якої деталізовано в Таблиці 4.15

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ n/n	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспро можні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Вихід на ринок компонентів для БПЛА та промислової автоматизації (B2B)	Концентрований маркетинг (фокус на вузьких нішах Defense Tech та Industry 4.0, де стандартна оптика не справляється)	Абсолютна вібростійкість; Миттєва швидкодія; Довговічність	Стратегія диференціації (конкуренція не за ціною, а за унікальними властивостями продукту)

Таким чином, в якості базової моделі розвитку обрано стратегію фокусованої диференціації. Вона передбачає концентрацію ресурсів на обслуговуванні вузькоспеціалізованих ніш (Defense Tech, Industry 4.0), де унікальні характеристики трансформатора — швидкодія та вібростійкість — забезпечують беззаперечну перевагу над конкурентами. Це дозволить уникнути виснажливої боротьби з масовими виробниками дешевої оптики та гарантувати ефективний старт проєкту. Наступним кроком є визначення конкретної тактики конкурентної боротьби, яку систематизовано в Таблиці 4.16.

Таблиця 16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ n/n	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Проєкт не є першопрохідцем	Клієнтів беремо у конкурентів	Копіюємо: стандартні кріплення та оптичні формати сенсорів Додаємо: абсолютну вібростійкість, миттєве фокусування (20 мс) та ресурс >1 млрд циклів.	Стратегія виклику лідера (флангова атака) (Атака на лідерів ринку у вузьких нішах — дрони та швидкісна автоматизація, де їхні механічні рішення є слабкими)

Аналіз обраної стратегії конкурентної поведінки свідчить, що стартап виходить на ринок із вже усталеною структурою, тому його комерційний успіх залежить від здатності ефективно акумулювати частку існуючих споживачів. Застосування тактики «флангової атаки» дозволяє уникнути прямого ресурсного протистояння з лідерами галузі. Замість прямого копіювання механічних аналогів, проєкт фокусується на нівелюванні їхніх ключових недоліків, пропонуючи натомість унікальні технічні переваги: миттєву швидкодію фокусування, абсолютну вібростійкість та необмежений ресурс роботи. Такий підхід дозволяє сформулювати

безальтернативну пропозицію для специфічних ринкових ніш, забезпечуючи клієнтам перехід на якісно вищий технологічний рівень.

Враховуючи специфічні вимоги цільових сегментів до надійності та функціональності обладнання, було сформовано стратегію ринкового позиціонування, основні елементи якої наведено в Таблиці 4.17.

. Таблиця 4.17. *Визначення стратегії позиціонування*

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспро- можні позиції власного стартап-проєкту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувану комплексну позицію власного проєкту (три ключових)</i>
1.	<p>Технічна надійність: Робота в умовах вібрацій та ударів (дрони, конвеєр).</p> <p>Швидкодія: Миттєва реакція на зміну дистанції до об'єкта.</p> <p>Ресурс: Відсутність необхідності в обслуговуванні механіки.</p>	<p>Стратегія диференціації (Відокремлення від конкурентів за рахунок унікальних технологічних властивостей, а не ціни)</p>	<p>Абсолютна вібростійкість (технологія Solid State). Миттєве фокусування (10–20 мс). Необмежений ресурс (>1 млрд циклів перемикань)</p>	<p>Швидкість. Надійність. Інноваційність.</p>

Таким чином, сформована стратегія позиціонування має на меті закріплення у сприйнятті споживача чіткого образу продукту, що асоціюється з безкомпромісною швидкістю, експлуатаційною надійністю та технологічною інноваційністю. Це дозволить ефективно диференціювати розробку на тлі класичних механічних систем, акцентуючи увагу на вирішенні критичних проблем галузі — вразливості до вібрацій та механічного зносу. Такий підхід сприятиме формуванню високого рівня довіри до бренду, насамперед з боку професійних замовників у сферах безпілотних систем та автоматизованого виробництва.

4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим етапом створення маркетингової програми є розробка концепції продукту, який буде запропоновано споживачам. В Таблиці 4.18 представлено узагальнені результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1.	Швидкісна автоматизація	Миттєве фокусування	Відсутність інерції: На відміну від механічних об'єктів, рідинна лінза реагує миттєво, що дозволяє збільшити продуктивність лінії у 2–3 рази
2.	Робота в русі	Стабільність зображення	Технологія Solid State: Відсутність рухомих скляних елементів робить систему невразливою до вібрацій, де звичайна оптика втрачає різкість або ламається
3.	Безперервна експлуатація	Економічна ефективність	Ресурс > 1 млрд циклів: Гарантована довговічність без механічного зносу

Підсумовуючи вищезазначене, можна стверджувати, що розроблений трансфокатор ефективно задовольняє специфічні потреби цільових сегментів, забезпечуючи суттєву технологічну перевагу над традиційними оптичними системами. Для глибшого розуміння комерційної сутності розробки та формування її цілісного сприйняття споживачем доцільно застосувати концепцію багаторівневого товару (модель Т. Левіта). Такий підхід дозволяє структурувати пропозицію на трьох рівнях: товар за задумом (ключова цінність), товар у реальному виконанні (технічна реалізація) та товар із підкріпленням (сервісна складова). Детальна характеристика цих рівнів для проєкту наведена в Таблиці 4.19.

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Вирішення проблеми отримання чіткого зображення в динамічних умовах. Основна вигода — надійність та швидкість: можливість миттєво (за 10–20 мс) змінити фокус без механічного переміщення лінз, що гарантує роботу навіть при сильних вібраціях (дрони, конвеєри).		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Швидкодія фокусування: 10–20 мс.		
	2. Технологія Solid State (відсутність рухомої механіки).	Нм	Тх
	3. Ресурс роботи: > 1 млрд циклів перемикачів.	М	Тл
	4. Інтегрований контролер з термостабілізацією.	Нм	Е/Тх
	5. Програмний інтерфейс (API/SDK) для керування.	М	Тх
	6. Стандартне кріплення (C-mount) та компактні габарити	Нм	Ор

	Якість: Відповідає промисловим стандартам вібростійкості та захисту (IP64/IP67). Параметри тестування — швидкість відгуку, оптична роздільна здатність, робота при температурних перепадах.
	Пакування: Індивідуальний захищений антистатичний кейс (ESD), у комплекті — кабелі підключення, флеш-накопичувач з ПЗ та драйверами, технічний паспорт.
	Марка: Новий український бренд високотехнологічної оптики
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Надання тестових зразків (MVP) для випробувань на обладнанні клієнта, інженерні консультації щодо сумісності
	Після продажу: Розширена гарантія (24 місяці), технічна підтримка інтеграції (допомога з кодом), регулярні оновлення прошивки контролера, адаптація драйверів під специфічні завдання замовника.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Унікальні запатентовані алгоритми керування лінзою (драйвер), ноу-хау у схемотехніці контролера, закритий вихідний код прошивки, реєстрація торгової марки.	

Після деталізації маркетингової архітектури продукту окрему увагу слід приділити механізмам захисту розробки від ринкового дублювання. У контексті проекту трансфокатора бар'єр для копіювання формується комплексно: через захист унікальних програмних алгоритмів керування варіолінзами (драйверів) як об'єктів інтелектуальної власності, а також через технологічні «ноу-хау» в схемотехніці контролера, що закладено на другому та третьому рівнях товару. Така комбінація робить реверс-інжиніринг пристрою економічно недоцільним для конкурентів.

Наступним критичним етапом є формування цінової політики, яка безпосередньо корелює з позиціюванням продукту та визначає рентабельність стартапу. Процес ціноутворення базується на порівняльному аналізі вартості механічних аналогів, оцінці платоспроможності пріоритетних груп клієнтів (сектор БПЛА, промислова автоматизація) та сприйнятті цінності інновації споживачем. Розрахунок граничних меж встановлення ціни наведено в Таблиці 4.20.

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
	200–500\$	1200–4500\$	Високий	1000–2500\$

Аналіз трирівневої архітектури товару підтверджує, що розроблений комп'ютерно-інтегрований трансфокатор формує для споживача комплексну ціннісну пропозицію. Вона базується на синергії унікальної функціональної вигоди — здатності працювати в умовах вібрацій та забезпечувати миттєву зміну фокуса — із супутніми сервісами програмної підтримки та інтеграції. Такий підхід значно посилює ринкові позиції стартапу та створює надійний фундамент для досягнення запланованих фінансових показників.

Наступним кроком є організація ефективних каналів товароруку, які гарантують своєчасне надходження продукції до промислових замовників та партнерів. Структуру та особливості формування системи збуту наведено в Таблиці 4.21.

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальн а система збуту</i>
1.	Професійна та раціональна	Інженерний супровід: консультації щодо сумісності, надання SDK.	0-рівневий (прямий): Безпосередній продаж виробникам дронів та техніки.	B2B продажі

		Логістика: безпечна доставка чутливої оптики. Сервіс: гарантійна заміна та техпідтримка інтеграції	1-рівневий: Продаж через спеціалізованих дистриб'юторів компонентів	
--	--	--	--	--

Підсумовуючи аналіз каналів розподілу, можна стверджувати, що для успішної комерціалізації розробки найбільш ефективною є модель прямих продажів (B2B). Орієнтація на професійних замовників — виробників БПЛА та інтеграторів промислової автоматики — вимагає від команди стартапу не лише логістичної організації поставок, а й забезпечення повноцінного інженерного супроводу (допомога з інтеграцією SDK, налаштування драйверів). Саме безпосередня комунікація дозволяє контролювати якість впровадження продукту та будувати довгострокові партнерські відносини, що є критичним для цього ринку.

Невід'ємною складовою успіху є ефективна стратегія просування. Враховуючи інноваційну природу трансформатора, маркетингові комунікації мають виконувати не лише рекламну, а й просвітницьку функцію — пояснювати технічні переваги відсутності механіки та демонструвати надійність технології. Концепцію комунікаційної політики, адаптовану під технічно підготовлену аудиторію, систематизовано в Таблиці 4.22.

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ n/n	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуютьс я цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціону вання	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Раціональний технічний пошук. Клієнти (інженери, технічні директори) шукають вирішення конкретних проблем (вібрація, затримка фокуса). Довіряють лише цифрам, технічній документації та реальним тестам, а не емоційній рекламі	Галузеві заходи: Виставки оборонних технологій та промислової автоматизації (Photonics, Automatica). Digital- канали: LinkedIn, YouTube (технічні демо), GitHub (приклад коду SDK), профільні форуми розробників дронів	Швидкість Надійність Інноваційн ість	Освітня та доказова функція: Пояснити принцип роботи «без механіки», довести стійкість до вібрацій на реальних прикладях, продемонстр увати перевагу у швидкості (відео порівняння)	«Технологія Solid State» Акцент на візуалізації різниці: спліт-скрін відео (зліва — розмита картинка з механічного об'єктива при трясці, справа — стабільна картинка з трансфокатор Заклик: «Забудьте про механічні поломки»

Таким чином, розроблена комунікаційна політика базується на принципах технічного прагматизму, що повністю відповідає запитам професійної аудиторії (інженерів та розробників). Фокусування на наочних інструментах переконання — відеодемонстраціях роботи в екстремальних умовах та публікації результатів стрес-тестів — дозволяє ефективно аргументувати ключові переваги технології Solid State: абсолютну вібростійкість та миттєву швидкодію. Такий підхід не лише сприяє подоланню бар'єрів сприйняття інноваційної оптики, але й формує репутацію надійного технологічного партнера, що є критичним фактором для укладання довгострокових контрактів у сферах Defense Tech та промислової автоматизації.

4.5. Бізнес-модель та реалізація стартап-проєкту

На завершальному етапі проєктування критичним завданням є побудова чіткої архітектури бізнесу, яка гарантує економічну стійкість та інвестиційну привабливість стартапу. Бізнес-модель повинна системно відображати логіку створення доданої вартості, механізми монетизації інновації, а також стратегію управління операційними витратами.

Стосовно проєкту комп'ютерно-інтегрованого трансфокатора, ефективна бізнес-модель базується на капіталізації його унікальних технологічних переваг: технології Solid State (відсутність рухомої механіки), миттєвій швидкодії фокусування та програмній адаптивності. Ключовим драйвером прибутковості є гібридний характер продукту, що поєднує захищену оптичну систему з пропрієтарним програмним забезпеченням (драйверами та SDK). Такий підхід дозволяє інтегрувати розробку в складні автоматизовані комплекси та безпілотні системи, забезпечуючи вихід на високомаржинальні ринки Defense Tech та Industry 4.0. Структуровану бізнес-модель проєкту наведено в Таблиці 4.23.

Таблиця 4.23 – Бізнес-модель

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Відносини з клієнтами	Сегменти користувачів
<p>Постачальники компонентів:</p> <p>Виробники рідинних лінз (Optotune/Corning), постачальники сенсорів та FPGA-контролерів.</p> <p>Технологічні партнери:</p> <p>Інтегратори безпілотних систем (OEM-виробники дронів), розробники софту для машинного зору (Computer Vision)</p> <p>Дистриб'ютори:</p> <p>Глобальні платформи електроніки (Mouser, Digi-Key) для виходу на ринок ЄС/США.</p>	<p>Виробнича: Розробка топології друкованих плат, збірка оптичних модулів, калібрування лінз.</p> <p>R&D (НДДКР): Написання драйверів керування (компенсація гістерезису), оптимізація алгоритмів автофокусу.</p> <p>Контроль якості: Стрес-тести на вібростійкість та термостабільність.</p> <p>Маркетинг: Участь у Tech-виставках, створення демо-</p>	<p>Вібростійкість: Стабільне зображення там, де механіка ламається;</p> <p>Швидкість: Фокусування за 10–20 мс (у 10 разів швидше за аналоги);</p> <p>Ресурс: >1 млрд циклів.</p> <p>Зниження витрат на ремонт та заміну оптики в дронах/роботах.</p> <p>Зручність: Готовий SDK для швидкої інтеграції в систему</p>	<p>Персональна підтримка: Виділений інженер для супроводу інтеграції (B2B).</p> <p>Спільнота: Доступ до закритого репозиторію з прикладами коду.</p> <p>Сервіс: Гарантійна заміна протягом 48 годин (критично для оборонки).</p>	<p>Виробники БПЛА та дронів: Потребують легкої, надійної оптики для розвідки та наведення.</p> <p>Промислова автоматизація (Industry 4.0): Виробничі лінії з високою швидкістю сортування.</p> <p>Робототехніка: Мобільні роботи, що працюють у складних умовах</p>

<p>НДІ: Лабораторії для метрологічної атестації та вібро випробувань.</p>	<p>стендів.</p>	<p>клієнта.</p>		<p>(тряска, удари). Наукові лабораторії Потреба у швидкій адаптивній оптиці</p>
	<p>Ключові ресурси Команда інженерів (оптика + embedded dev); Інтелектуальна власність (патенти на драйвер); Оптична лабораторія.</p>		<p>Канали збуту Прямі продажі (Direct Sales); Галузеві виставки; Партнерська мережа системних інтеграторів</p>	
<p>Структура витрат Змінні витрати: Закупівля варіолінз та електроніки (найбільша частка), виробництво корпусів. Постійні витрати: Оренда лабораторії, зарплата R&D команди, ліцензування ПЗ. Маркетинг: Витрати на участь у міжнародних виставках та сертифікацію (CE, MIL-STD).</p>		<p>Джерела доходів Продаж обладнання: Реалізація готових трансфокаторів. Послуги інтеграції: Платна адаптація драйверів під специфічне «залізо» замовника. Ліцензування: Роялті за використання унікальних алгоритмів автофокусу (у випадку OEM-партнерства)</p>		

Таким чином, запропонована бізнес-модель орієнтована на комерціалізацію високотехнологічного продукту, що поєднує апаратну надійність технології Solid State із гнучкістю програмного керування. Фокусування на платоспроможних сегментах ринку (Defense Tech, робототехніка), де існують критичні вимоги до швидкодії та експлуатаційного ресурсу оптики, створює передумови для швидкого захоплення частки ринку та стабільної монетизації. Гібридний підхід до отримання прибутку (продаж пристроїв + послуги інтеграції) посилює стійкість стартапу та відкриває перспективи глобального масштабування через OEM-партнерства.

Перехід від концепції до реального виробництва вимагає чіткого планування часових ресурсів та етапності робіт. Розробка календарного плану-графіка (Таблиця 4.24) є необхідним інструментом для систематизації процесу впровадження проєкту, що дозволить забезпечити контроль ключових показників ефективності (KPI) на кожній стадії та оптимізувати розподіл інвестиційного бюджету.

Таблиця 4.24 – Календарний план реалізації проєкту

Етап	Тривалість	Опис робіт
Проєктування апаратної частини	2 місяці	Розрахунок оптичної схеми трансфокатора, вибір моделей варіолінз (Optotune/Corning). Розробка схемотехніки контролера керування (PCB design) та конструкції захищеного корпусу. 3D-модельовання та тепловий розрахунок
Розробка програмного забезпечення (Firmware & SDK)	2 місяць	Написання низькорівневого коду (firmware) для мікроконтролера: алгоритми керування струмом, температурна компенсація. Розробка API та SDK для інтеграції з Windows/Linux. Створення алгоритмів автофокусу.
Прототипування та лабораторні випробування	3 місяці	Виготовлення MVP. Юстування оптичної системи. Стендові випробування: перевірка роздільної здатності (MTF), тестування

		швидкодії (20 мс) та вібростійкості на вібростенді. Валідація заявлених характеристик.
Пілотні впровадження та маркетинг	2 місяці	Передача тестових зразків партнерам (виробникам БПЛА) для польових випробувань. Збір зворотного зв'язку, доопрацювання прошивки. Презентація технології на профільних виставках, створення демо-відео.
Комерційний запуск та масштабування	1 місяць	Укладання договорів з постачальниками компонентів на серійні партії. Офіційний старт продажів. Організація лінії техпідтримки та сервісу.

Таким чином, розроблений календарний план забезпечує структурну цілісність процесу перетворення інженерної ідеї на готовий комерційний продукт. Поетапна реалізація, що охоплює проектування оптоелектронної частини, написання програмного коду та всебічні випробування, дозволяє мінімізувати технічні ризики, притаманні складним апаратним стартапам. Особливу увагу приділено пілотним впровадженням, які слугують інструментом валідації заявлених характеристик вібростійкості та швидкодії в реальних умовах експлуатації, що є критичним для формування довіри з боку промислових споживачів.

Враховуючи міждисциплінарний характер проєкту (поєднання оптики, електроніки та програмування), успіх його реалізації безпосередньо залежить від синергії технічних та управлінських компетенцій виконавців. Кваліфікаційний склад команди, необхідний для забезпечення повного циклу розробки та виведення трансфокатора на ринок, деталізовано в Таблиці 4.25

Таблиця 4.25 – Команда проєкту

Роль	Вміння і вклад у розробку
Керівник проєкту	Загальна координація R&D, стратегічне планування, управління бюджетом та ризиками. Налагодження ланцюгів постачання компонентів, переговори з ключовими B2B-партнерами (виробники дронів, інтегратори).
Інженер-оптотехнік	Розрахунок оптичної схеми трансфокатора, моделювання у Zemax. Підбір рідинних лінз та сенсорів. Проєктування захищеного корпусу, контроль збірки оптичного модуля.
Інженер-програміст	Написання прошивки мікроконтролера для керування фокусом. Розробка високорівневого API та SDK для інтеграції трансфокатора в операційні системи замовника. Реалізація алгоритмів автофокусу.
Інженер-електронік	Розробка схемотехніки контролера керування (PCB Design), трасування друкованих плат. Забезпечення стабільного живлення та захисту від перешкод. Інтеграція драйверів керування лінзою на апаратному рівні.
Інженер з контролю якості	Розробка та налаштування контролерів руху, плата керування двигунами, інтеграція електронних модулів, забезпечення стабільності та безпеки роботи системи.
Маркетолог	Аналіз ринку Defense Tech та промислової оптики. Підготовка технічної документації та white papers. Організація участі у профільних виставках, створення демонстраційних стендів, комунікація з технічними спеціалістами замовників.

Таким чином, сформована мультидисциплінарна команда, що поєднує глибокі інженерні компетенції в галузі оптоелектроніки з навичками стратегічного менеджменту, створює надійний фундамент для дотримання календарного графіку та досягнення технічних цілей проєкту.

Наступним критичним етапом є фінансове моделювання, яке вимагає детальної калькуляції витрат на всіх стадіях життєвого циклу стартапу: від закупівлі високовартісних компонентів (варіолінз, сенсорів) та R&D розробок до маркетингового просування готового виробу. Чітке розуміння структури видатків дозволяє обґрунтувати обсяг необхідних інвестицій, оптимізувати використання бюджету та мінімізувати фінансові ризики. Розрахунок планових витрат на реалізацію проєкту систематизовано в Таблиці 4.26.

Таблиця 4.26 – Структура витрат

Категорія витрат	Сума (у грн)	Коментар
Розробка та R&D	120,000	Оплата роботи інженерів-оптотехніків та програмістів (embedded). Включає розрахунок оптичної системи, проектування схемотехніки контролера, написання драйверів керування та SDK
Закупівля комплектуючих	130,000	Найбільш витратна частина: придбання рідинних лінз (Optotune/Corning), оптичних сенсорів, мікроконтролерів (STM32/FPGA), виготовлення друкованих плат (PCB) та 3D-друк/фрезерування захищеного корпусу.
Тестування та метрологія	45,000	Оренда вібростенду для краш-тестів (перевірка вібростійкості), використання оптичної лави для юстування, виготовлення калібрувальних мішеней, кліматичні випробування (термостабільність).

Маркетинг та просування	30,000	Участь у профільних виставках (Defense Tech/Automation), створення якісного промо-відео (демонстрація роботи при вібрації), друк технічних буклетів, таргетована реклама в LinkedIn.
Юридичні та адміністративні витрати	20,000	Реєстрація стартапу, патентний пошук та оформлення прав на інтелектуальну власність (алгоритми керування), бухгалтерський супровід.
Непередбачені витрати	15,000	Резервний фонд (5%) на випадок коливання валютного курсу (комплектуючі імпорتنі), необхідність додаткових ітерацій прототипування або термінової доставки деталей
Загальна сума:	360,000 грн	—

Таким чином, сформований кошторис відображає стратегічний пріоритет проекту — створення технологічно досконалого продукту. Концентрація основних фінансових ресурсів на матеріально-технічному забезпеченні (закупівля прецизійної оптики та електроніки) та R&D дозволяє гарантувати високу якість MVP, що є критичною умовою для виходу на ринки Defense Tech та промислової автоматизації. Водночас, передбачення витрат на метрологічну атестацію та формування резервного фонду забезпечує фінансову стійкість стартапу перед можливими курсовими коливаннями чи логістичними затримками.

Висновок до розділу

Проведений маркетинговий аналіз та детальне опрацювання концепції стартап-проекту дозволили сформувавши чітке бачення його ринкових перспектив. Розроблюваний комп'ютерно-інтегрований трансфокатор на базі варіолінз є високоактуальним рішенням для секторів Defense Tech та Industry 4.0, де існує гостра

потреба в оптиці, стійкій до вібрацій та жорстких умов експлуатації. Закладені в основу проєкту технологічні переваги — миттєва швидкодія фокусування (10–20 мс), відсутність рухомих механічних вузлів (Solid State) та глибока програмна інтеграція — повністю відповідають критичним вимогам сучасних безпілотних систем та роботизованих комплексів.

Підґрунття для комерційного успіху проєкту формується завдяки синергії кількох факторів. По-перше, інноваційна архітектура пристрою вирішує головну «больову точку» споживачів — низьку надійність класичних механічних зум-об'єктивів в динамічних умовах. По-друге, глобальний тренд на роботизацію та використання технічного зору стимулює попит на «розумну» оптику, яку можна програмно адаптувати під специфічні завдання. По-третє, продукт займає вільну нішу між дорогими промисловими аналогами та дешевими рішеннями з низьким ресурсом, пропонуючи оптимальне співвідношення ціни та експлуатаційних характеристик (ТСО).

Аналіз цільової аудиторії підтвердив наявність стійкого попиту на системи, що забезпечують стабільність зображення без необхідності частого обслуговування. Ключові сегменти — виробники БПЛА та інтегратори промислової автоматки — висувають вимоги не лише до оптичних параметрів, а й до простоти інтеграції. Запропоноване рішення задовольняє цей запит завдяки наявності готового SDK та драйверів, що мінімізує час впровадження трансфокатора в кінцеві вироби замовників.

На основі отриманих даних визначено стратегію розвитку стартапу: фокусування на B2B-продажах, пряма взаємодія з інженерними відділами клієнтів та позиціонування продукту як найнадійнішого рішення у своєму класі. Обрана бізнес-модель є гібридною і передбачає отримання доходу як від реалізації апаратних модулів, так і від надання послуг з інженерної інтеграції та ліцензування унікальних алгоритмів керування. Це створює диверсифіковані потоки прибутку та підвищує інвестиційну привабливість бізнесу.

Розроблений календарний план забезпечує системне управління проєктом, дозволяючи синхронізувати процеси апаратної розробки (Hardware), написання програмного забезпечення (Firmware) та проведення полігонних випробувань.

Збалансована команда, що об'єднує компетенції в галузі прикладної оптики, мікроелектроніки та embedded-програмування, здатна забезпечити високу якість реалізації технічних завдань та ефективно виведення продукту на ринок.

Таким чином, сформовано цілісну концепцію запуску високотехнологічного стартапу. Проєкт має всі необхідні передумови для успіху: технологічну новизну (захищену патентами/ноу-хау), підтверджену ринкову потребу, гнучку бізнес-модель та фахову команду. Реалізація запланованих заходів дозволить створити конкурентоспроможний український продукт подвійного призначення, що має високий потенціал до масштабування як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації вирішено задачу синтезу оптичної системи трансфокатора з урахуванням і на основі результатів виконаних в цій роботі досліджень впливу оптичних сил варіолінз на осьове положення їх кардинальних точок. Для цього:

1. Зроблено огляд стану розвитку адаптивних електрично керованих варіолінз.
2. Обґрунтовано використання в якості компонентів афокальної зум- системи трансфокатора еластомірної мембранної лінзи компанії Optotune ML-20-37.
3. Досліджено вплив зміни оптичної сили відомих моделей варіолінз на зміну осьового положення їх кардинальних точок.
4. Показано, що рух кардинальних точок практично лінійно пов'язаний із зміною оптичної сили варіолінз.
5. Використання результатів досліджень рухів кардинальних точок дозволило повністю усунути дефокусування зображення, сформованого оптичною системою модельованого трансфокатора.
6. Подальшим напрямком досліджень оптичних властивостей варіолінз слід вважати пошуки методів розширення діапазону зміни оптичних сил варіокомпонентів за рахунок поєднання варіолінз з лінзами адаптерами, що мають фіксовану оптичну силу.

Дану роботу було апробовано на XXI Всеукраїнської науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”

Публікація: Губійчук Р.О., студент гр. ПГ-41мп, д.т.н., проф. Чиж І.Г КПП ім. Ігоря Сікорського. Дослідження руху кардинальних точок в комп'ютерно інтегрованих варіолінзах // Збірник праць XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 10-11 грудня 2025р. — К.: ПБФ, КПП ім. Ігоря Сікорського. - 2025.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- 1) Kingslake R., Johnson R. B. Lens Design Fundamentals. Academic Press, 2010.
- 2) Smith W. J. Modern Lens Design. McGraw-Hill Education, 2020.
- 3) Чиж І.Г./ Теорія оптичних систем : підручник / Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського/Вид-во «Політехніка» —2022— с.426
- 4) Kim J., Lee S. Adaptive liquid lens technology for compact imaging systems // Optical Engineering. 2021. Vol. 60(8). 082402.
- 5) Liu X. et al. Miniaturized zoom imaging system based on liquid lenses // Applied Optics. 2019. Vol. 58(4). P. 983–990.
- 6) Zhang Y. et al. Electrically tunable lenses for optical systems without moving parts // Optics Letters. 2022. Vol. 47(12). P. 3071–3074.
- 7) Zou H., Hua X. Introduction to Adaptive Lenses. Wiley, 2017.
- 8) Ren H., Wu S.-T. Introduction to Adaptive Lenses. 2012. 286 с.
- 9) Kim J., Oh J., Lee S., Cho J. Recent Advances in Adaptive Optics Using Varifocal Lenses // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 5. Article 2511. DOI: 10.3390/s23052511.
- 10) Xu S. et al. Tunable-focus liquid crystal lenses for imaging applications // Journal of Display Technology. 2020. Vol. 16(6). P. 233–240.
- 11) Elcyo Technology [Electronic resource]. URL: <https://en.elcyo.com/technology>
- 12) Oh S., Lee S., Kim H. Miniaturization of Liquid Crystal Varifocal Lenses for Portable Optics // Optics Express. 2021.
- 13) Corning Varioptic Lenses [Electronic resource]. URL: <https://www.corning.com/varifocal-lenses/>
- 14) Optotune - Focus tunable lenses [Electronic resource]. URL: <https://optotune.com/>
- 15) Liu X., Huang Y., Tang Z., Wang Y. Adaptive Varifocal Lenses Based on Dielectric Elastomer Actuator // Applied Optics. 2019. Vol. 58(4). P. 983–990.
- 16) Li T., Sun J. et al. Adaptive Varifocal Lenses Based on Dielectric Elastomer Actuator // Scientific Reports. 2019.
- 17) Xu Q., Li X., Zhao Y. Elastomer-Based Adaptive Lenses with Low Power Consumption // Advanced Optical Materials. 2020.

- 18) Kim J., Park C. High-Quality Tunable Lenses with Reduced Aberrations via Aspheric Membrane Design // Journal of Optical Society of America A. 2022.
- 19) Yang D., Yu H., Wang W. Wide-Range Focus Tunable Lenses Using Hybrid Actuation Mechanisms // Optics Letters. 2023.
- 20) Barachevsky V. A. Adaptive Optics and Varifocal Lenses: Current Trends and Prospects // Optical Engineering. 2022.
- 21) Lin Y., Wong J. Fast-Response Adaptive Lenses for Machine Vision Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021.
- 22) Chen X., Zhou L. AI-Integrated Varifocal Lenses for Autonomous Optical Systems // Applied Optics. 2024.
- 23) Chyzh I., Lazarenko K. / Three-component lens zoom-afocal transfocal systems / Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects» (March 19-20, 2023)/Brighton, United Kingdom Scientific Collection InterConf — №31[147] — March, 2023 — P.509-521. DOI 10.51582/interconf.19-20.03.2023.054
- 24) Лісняк К. С., Чиж І. Г. Варіооб'єктиви трансфокатори // «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ» (ПБ-2015) : матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф. [Електронний ресурс]. Київ, 2015. С. 131–132.