

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра оптичних та оптико-електронних технологій

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 535.42

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.Г. Колобродов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 152. Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і назва спеціальності)

на тему: Стенд для дослідження оптичних характеристик дифракційних лінз

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ПО-82мп
(шифр групи)

Вовчок Іван Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник ас.кафедри ООЕП, к.т.н., Васильковська І.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

РЕФЕРАТ

Вовчок І.О. Стенд для дослідження оптичних характеристик дифракційних лінз – Наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка». Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2019.

Останнім часом дифракційні оптика все більше використовується в оптичних та оптико-електронних приладах, як самостійно так і в складі складних оптико-електронних систем. Її використовують майже у всіх галузях науки і техніки починаючи з військових розробок, закінчуючи побутовими об'єктивами. Особливу увагу слід приділити використанню дифракційних лінз в офтальмології, де їх використовують як контактні лінзи, а також для заміни природного кришталіка ока людини штучним – інтраокулярною лінзою. Оскільки форма поверхні дифракційних лінз досить складна, а також має бути точно відтвореною, постає невідкладне питання контролю якості даних лінз. Стенд запропонований в цій роботі базується на міжнародному стандарті ISO 11979, але має певні переваги перед наведеним в цьому стандарті зразком.

Перший розділ присвячений дослідженню проблеми, розглянуто технологічні особливості виготовлення та контролю дифракційних лінз, а також приведені вже відомі аналоги подібних установок.

У другому розділі розглядаються теоретичні методи розрахунку оптичних характеристик дифракційних лінз, більш детально описані різноманітні дифракційні лінзи, зокрема інтраокулярні, а також представлено схему лабораторної установки розробленого в цій роботі стенду.

У третьому розділі представлені короткі теоретичні відомості, які використовуються для отримання результатів, та представлені зображення, отримані на експериментальному стенді, з відповідною подальшою обробкою, що є результатами дослідження.

Четвертий розділ присвячений створенню стартап-проекту. В ньому розглянуто потенційні можливості виходу на ринок з даною розробкою та можливість залучення зовнішніх інвестицій в подальшу розробку та вдосконалення проекту.

У процесі розробки магістерської дисертації було написано наступні роботи:

1. Вовчок І. О. Перспективні дифракційні технології / І. О. Вовчок, О. І. Чікіда. // XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». Матеріали конференції. – Київ, 2019. – С. 67–69.

2. Вовчок І. О. Сучасний стан ринку дифракційних лінз / О. І. Чікіда, І. О. Вовчок. // XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». Матеріали конференції. – Київ, 2019. – С. 92–94.

Ключові слова: дифракційна лінза, інтраокулярна лінза, стенд, дослідження оптичних характеристик, дифракційна ефективність, модуляційна передавальна функція.

ABSTRACT

Vovchok I.O. The stand for research of diffractive lenses optical characteristics - Scientific work is manuscript copyright.

This is for a Master's Degree in Specialty – 152 «Metrology and Information and Measurement Engineering». National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

Recently, diffraction optics has been increasingly used in optical and optoelectronic devices, both independently and as part of complex optoelectronic systems. It is used in almost every field of science and technology, from military development to household lenses. Particular attention should be paid to the use of diffractive lenses in ophthalmology, where they are used as substitutes for natural lenses, as well as contact lenses. Since the shape of the diffractive lens surface is rather complex and should be fairly accurate, the urgent issue of quality control of the

lens data arises. The stand offered in this work is based on the international standard ISO 11979, but has certain advantages over the standard in this standard.

The first section is devoted to the study of the problem, the technological features of the manufacture and control of diffraction lenses, as well as the already known analogues of such installations.

The second section discusses the theoretical methods of calculating the optical characteristics of diffractive lenses, describes in more detail the various diffractive lenses, in particular the intraocular ones used in ophthalmology, and presents a diagram of a laboratory unit developed in this work of the stand.

The third section presents brief theoretical data used to obtain the results, and presents the images obtained by the stand with the corresponding processed study results.

The fourth section is about creating a startup project. It examines the potential for entry into the market with this development and the possibility of attracting external investment in further development and improvement of the project.

During the project development the following works were written:

1. Vovchok I.O. Perspective diffraction technologies / I.O. Vovchok, O.I. Chikida. // XX International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists «Efficiency of engineering decisions in instrument making». Conference materials. – Kyiv, 2019. - P. 67-69.

2. Vovchok I.O. The current state of the diffraction lens market / O.I. Chikida, I.O. Vovchok. // XX International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists «Efficiency of engineering decisions in instrument making». Conference materials. – Kyiv, 2019- 2019. - P. 92-94.

Keywords: diffractive lenses, intraocular lenses, stand, investigation of optical characteristics, diffraction efficiency, modulation transfer function.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	11
1.1 Актуальність використання ДОО в сучасній техніці.....	11
1.1.1 Теоретичні відомості.....	11
1.1.2 Технічні особливості виготовлення ДОО.....	16
1.1.3 Короткий огляд характеристик зарубіжних біфокальних ІОЛ.....	18
1.1.4 Контроль процесу створення ДОО.....	20
1.2 Експериментальне дослідження ДОО.....	22
1.2.1 Схема установки для контролю ІОЛ 2.....	25
1.2.2 Схема установки для контролю ІОЛ 3.....	26
1.2.3 Вимірювання оптичних характеристик ДОО.....	28
1.2.4 Вимірювання дифракційної ефективності ДОО за багатьма порядками дифракції.....	29
1.3 Огляд аналогів.....	32
1.4 Висновок до розділу 1.....	36
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ.....	38
2.1 Класифікація дифракційних оптичних елементів.....	38
2.2 Інтраокулярна лінза.....	41
2.2.1 Асферичні ІОЛ.....	41
2.2.2 Торичні ІОЛ.....	42
2.2.3 Допоміжні ІОЛ.....	43
2.2.4 Мультифокальні ІОЛ.....	44
2.2.5 Monovision.....	45

	8
2.2.6 Інший тип ІОЛ для кожного ока.....	45
2.3 Лінза Френеля.....	46
2.4 Стенд для дослідження характеристик ДЛ та ІОЛ.....	49
2.4.1 Опис стенду.....	52
2.4.2 Методи вимірювання задньої вершинної рефракції.....	54
2.4.3 Вимірювання роздільної здатності.....	57
2.4.4 Дослідження модуляційної передавальної функції.....	57
2.5 Загальний вигляд експериментального стенду.....	59
2.6 Висновок до розділу 2.....	60
РОЗДІЛ 3 ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРОБЛЕНОГО СТЕНДУ	61
3.1 Зображення, отримані стендом.....	62
3.2 Побудова функції розсіювання точки.....	63
3.3 Розрахунок модуляційної передавальної функції.....	64
3.4 Висновок до розділу 3.....	68
РОЗДІЛ 4.РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ».....	69
4.1 Опис ідеї проекту.....	69
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	72
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	73
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	81
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	83
4.6 Висновок до розділу 4.....	87
ВИСНОВКИ.....	88
Список літератури.....	89

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДЕ	дифракційна ефективність
ДЛ	дифракційна лінза
ДОЕ	дифракційний оптичний елемент
ДП	дифракційний порядок
ЗВР	задня вершинна рефракція
ЗФВ	задня фокусна відстань
ІОЛ	інтраокулярна лінза
ІЧ	інфрачервоний
МПФ	модуляційна передавальна функція
ОПФ	оптична передавальна функція
ОС	оптична система
ПВ	приймач випромінювання
ПЗЗ	прилад із зарядовим зв'язком
ФРЛ	функції розсіювання лінії

ВСТУП

За останній час дифракційна оптика все більше і більше застосовується у різних галузях науково-технічного розвитку. Дифракційні оптичні елементи (ДОЕ) успішно використовуються в різних оптичних системах від військових до медичних. Оскільки технологія виготовлення таких елементів досить складна, а точність усіх параметрів повинна бути високою, то виникає потреба у зручному та доступному методі контролю подібних елементів, зокрема стенді для вимірювання основних оптичних характеристик ДОЕ. Закордонні варіанти у своїй більшості дорогі і складні в використанні, тому задачею цієї дисертації є знаходження оптимального методу аналізу найважливіших характеристик ДОЕ, при прийнятній ціні і з використанням доступних для нас ресурсів.

Оскільки спектр ДОЕ доволі широкий, тому ми зупинимось на дифракційних лінзах (ДЛ), в тому числі інтраокулярних лінзах (ІОЛ), які використовуються в офтальмології для заміни природного кришталика ока штучним. Вибір оптимальних оптичних характеристик ІОЛ є ще невирішеним завданням, так як вибір таких характеристик є строго індивідуальним для конкретного пацієнта. Тому важливо визначати характеристики ІОЛ дуже точно, адже їхнє використання пов'язане зі здоров'ям та комфортним життям людини. Цей напрям є перспективним, оскільки дуже стрімко розвивається в нашій країні. Є багато видів ІОЛ, деякі з яких будуть розглянуті в даній роботі.

Отже, доцільність вивчення нових методів дослідження ДЛ та проведення відповідних вимірювань, які б дозволили задовольнити усе більшу кількість вимог, які ставляться сьогодні для вирішення різноманітних задач науки і техніки є незаперечною. Метою магістерської дисертації є розробка зручного і доступного стенду для вимірювання характеристик, який буде задовольняти усім вимогам які ставлять перед ним спеціалісти, а також буде надійним рішенням і згодом зможе скласти конкуренцію закордонним аналогам.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів згідно з планами науково-дослідних робіт кафедри ООЕП КПІ ім. Ігоря Сікорського.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Актуальність використання ДОЕ в сучасній техніці

Бурхливий розвиток сучасних методів лазерної фізики і комп'ютерних технологій дозволило створити цілий ряд нових дифракційних оптичних елементів (ДОЕ) для перетворення і аналізу світових когерентних пучків: фокусаторов, моданів, кореляційних фільтрів, цифрових голограм і т.д. Значна частина цих елементів реалізується у вигляді прозорих у видимому і ІЧ-діапазонах хвиль пластин з оптичних діелектричних матеріалів (кварцове скло, кварц, селенід цинку, полімерні матеріали) з дифракційним мікрорельєфом. До актуальних проблем науки і техніки, для яких успішне вирішення задачі оптимізації мікрорельєфу ДОЕ на прозорих діелектриках має велике значення, відносяться: створення елементів дифракційної лазерної оптики для фокусування пучків лазерів ІК-діапазону середньої і великої потужності в складні двовимірні області і синтез модульованих дифракційних решіток для аналізу спектра поперечних мод і формування лазерних пучків із заданими параметрами поширення в хвилеводному середовищі.

1.1.1 Теоретичні відомості

Для опису дифракційних явищ використовується принцип Гюйгенса-Френеля [1]. Точкове джерело охоплюється уявною замкнутою поверхнею довільної форми. Світлова хвиля, яка дійшла до довільної точки цієї поверхні, збуджує в цій точці коливання, в результаті цю точку можна тепер інтерпретувати як джерело вторинної хвилі, що розповсюджується від цієї точки у всіх можливих напрямках. Амплітуда коливань світлової хвилі в довільній точці простору за межами поверхні вторинних джерел визначається шляхом додавання всіх вторинних хвиль, які прийшли в цю точку від усіх вторинних джерел. Результат додавання двох хвиль, що прийшли в одну точку, залежить від різниці фаз коливань в хвилях, які прийшли. Якщо фази однакові (синфазні коливання), сумарна амплітуда дорівнює сумі амплітуд, якщо фази

протилежні (протифазні коливання), сумарна амплітуда дорівнює різниці амплітуд. Різниця фаз коливань в двох хвилях визначається, в свою чергу, різницею початкових фаз коливань відповідних вторинних джерел і різницею оптичних довжин шляху цих хвиль. Оптична довжина шляху – це добуток геометричної довжини шляху на показник заломлення середовища. [1]

Таким чином, розраховуючи амплітуду сумарної хвилі в кожній точці простору, можна отримати просторовий розподіл інтенсивності світла (пропорційної квадрату амплітуди), що дає довільна оптична система. Аналітичний розрахунок у відповідності з принципом Гюйгенса-Френеля можливий лише для деяких найпростіших окремих випадків, наприклад, для дифракції на довгій вузькій щілині чи на круглому отворі. В останньому випадку для оцінки амплітуди сумарної хвилі в довільній точці на осі симетрії системи поверхню вторинних джерел суміщають з тією частиною хвильового фронту, яка вкладається в отвір. Цю частину хвильового фронту уявно розбивають на кільцеві зони. Радіуси зон підбирають таким чином, щоб відстань від зовнішнього і внутрішнього краю кожної зони до точки на осі, в якій оцінюється амплітуда світлової хвилі відрізнялись на половину довжини світлової хвилі. Кільцеві зони, отримані в результаті такого розбиття, називаються зонами Френеля, оскільки всі вторинні джерела на хвильовому фронті синфазні (за визначенням хвильового фронту), то дві хвилі від двох країв кожної зони приходять в точку спостереження у протифазі (так як різниця ходу дорівнює півхвилі) і практично повністю гасять одна одну. У цьому випадку коливання від кожної пари сусідніх зон Френеля також практично повністю гасять одна одну, так як для будь-якої довільної хвилі, що приходить в точку спостереження із одної зони, завжди знайдеться вторинна хвиля із сусідньої зони, така, що різниця ходу між цими двома хвилями в точці розбиття буде дорівнювати півхвилі. В цьому і полягає зручність розбиття хвильового фронту на кільцеві зони Френеля. Якщо на отворі вкладається парна кількість цих зон, то коливання в точці спостереження від кожної пари сусідніх зон будуть гасити одна одну, і в точці спостереження буде мати місце

дифракційний мінімум – темна пляма. Якщо на отворі вкладається непарна кількість зон Френеля, то одна із зон залишиться не скомпенсованою і в точці спостереження буде дифракційний максимум – світла пляма. Якщо закрити зони Френеля через одну непрозорою перешкодою (зонна пластинка), то хвилі від усіх незакритих зон будуть підсилювати одна одну в точці спостереження і там, де буде мати місце дифракційний максимум, інтенсивність якого в багато разів більше інтенсивності максимуму для випадку, коли на отворі непарна кількість зон і всі вони закриті. Якщо зони через одну не закривати, а будь-яким способом змінити фазу хвилі на виході із кожної такої зони на протилежну, то хвилі від усіх без виключення зон Френеля будуть підсилювати одна одну в точці спостереження і дифракційний максимум буде ще більшим, ніж у попередньому випадку. Якщо в отворі нічого немає, то таку зміну фази на протилежну можна отримати, помістивши на шляху хвилі прозору пластинку, на яку нанесені кільцеві канавки навпроти кожної парної чи непарної зони з глибиною, що забезпечує додаткову оптичну різницю ходу променів, що проходять через сусідні зони, в половину довжини хвилі. Це фазова зонна пластинка.[1]

Якщо в отворі знаходиться лінза, то такі кільцеві канавки можна нанести безпосередньо на одну із поверхонь цієї лінзи. В результаті отримаємо дифракційно-рефракційну лінзу. Дифракційний максимум, що дає дана лінза, цілком придатний для отримання зображення не гіршого, ніж рефракційний фокус звичайної рефракційної лінзи. Цей дифракційний максимум можна ще більше підсилити. Глибина кожної канавки звичайної фазової зонної пластинки однакова по всій ширині канавки, а проміжки між канавками є плоскими. Це значить, що в межах кожної зони довжина шляху хвилі до точки спостереження безперервно збільшується при збільшенні радіальної координати вторинного джерела від внутрішнього до зовнішнього краю кожної зони. Це значить, що вторинні хвилі, що приходять в точку спостереження від вторинних джерел в межах кожної зони, приходять туди не в однаковій фазі. Не в протифазі (за винятком двох крайніх точок зони), але і не в однаковій фазі.[1]

Це і є останнім резервом збільшення інтенсивності дифракційного максимуму. Зміна фази в межах кожної зони може бути скомпенсована змінною глибиною канавок. Якщо нанести канавки змінної глибини, кожна із яких буде перекривати дві сусідні зони Френеля, а глибина кожної канавки буде безперервно збільшуватися по мірі віддалення від центра від нуля до величини, що забезпечує додаткову різницю ходу, в одну довжину хвилі, то всі хвилі і від сусідніх зон і в межах кожної зони будуть приходити в точку спостереження в однаковій фазі і давати дифракційний максимум гранично більшої амплітуди. Інтенсивність світла в цьому максимумі майже не поступається інтенсивності світла у фокусі звичайної монофокальної рефракційної лінзи. Виникає природне запитання – навіщо застосовувати таку складну конструкцію лінзи, щоб отримати інтенсивність світла в максимумі, що не перевищує інтенсивність у фокусі простої рефракційної лінзи? З точки зору отримання зображення це дійсно не має сенсу, якщо дифракційно-рефракційна лінза використовується як монофокальна лінза. Тому дифракційно-рефракційні лінзи використовуються виключно в якості мультифокальних лінз. Наявність кількох дифракційних максимумів являється характерною властивістю самого явища дифракції, обумовленого хвильовою природою світла. Дифракційні максимуми спостерігаються в тих точках, в які вторинні хвилі приходять з різницею ходу в будь-яке ціле число довжин хвиль, і таких точок може бути досить багато. Розподіл енергії світла по всім цим максимумам звичайно не буває однаковим. Для розглянутої вище лінзи з трикутним дифракційним профілем існує лише один максимум, придатний для формування зображення з інтенсивністю, практично такою ж як у фокусі рефракційної лінзи. Це дифракційний максимум 1-го порядку. Інтенсивність світла в усіх інших максимумах більш високого порядку дуже мала і ці максимуми непридатні для отримання зображення. Лінза, максимальна глибина трикутних канавок якої відповідає різниці ходу в одну довжину хвилі, є, таким чином, практично монофокальною лінзою. Якщо глибина канавок дорівнює нулю (канавок просто немає), то дифракційний розрахунок із застосуванням принципу Гюйгенса-Френеля дає дифракційний

максимум в тому ж місці, де знаходиться рефракційний фокус даної лінзи. У цій точці різниця ходу всіх променів, що пройшли через лінзу за законами дифракційної оптики, дорівнює нулю. Це властивість ідеальної лінзи. Відповідно, в цій точці буде максимум інтенсивності за законами як геометричної, так і хвильової оптики. Це дифракційний максимум нульового порядку. Його положення співпадає з положенням рефракційного фокусу і не співпадає з положенням дифракційного максимуму першого порядку і дуже слабкі максимуми більш високих порядків. Дифракційного максимуму нульового порядку немає. В цьому і іншому випадку лінза являється монофокальною. Якщо зробити максимальну глибину канавок трикутного профілю такою, яка забезпечує різницю ходу приблизно в половину довжини хвилі (половинний профіль), то лінза буде давати два максимуму – нульового і першого порядку приблизно однакової інтенсивності і деяка кількість максимумів більш високих порядків з дуже малою інтенсивністю. [1]

Такі дифракційно-рефракційні ІОЛ звичайно і застосовуються на практиці. Їх основна перевага полягає в тому, що навіть при дуже хорошому освітленні, тобто при малому діаметрі зіниці (приблизно 3 мм) залишаються відкритими декілька центральних дифракційних кілець і мультифокальність лінзи зберігається. Максимум нульового порядку знаходиться ближче до сітківки і забезпечує дальнє бачення. Максимум першого порядку знаходиться далі від сітківки і забезпечує ближнє бачення. Положення максимуму нульового порядку точно на сітківці для дальнього бачення забезпечується належним вибором радіуса кривизни рефракційної гладкої поверхні лінзи. Відстань між максимумами і тим самим положення максимуму першого порядку на сітківці для ближнього бачення регулюється зміною радіусів кільцевих зон. Це положення найчастіше підбирається таким чином, щоб забезпечувати додаткову заломлюючу силу приблизно 3 дптр., тобто відстань ближнього бачення біля 33 см. Зміною глибини канавок можна впливати на розподіл енергії між двома фокусами. [2]

1.1.2 Технічні особливості виготовлення ДОЕ

З науково-технічної точки зору головною проблемою, що постає перед дослідниками слід вважати необхідність суворого контролю за кожним кроком проектування приладу. Ризик відмови системи може залежати від відсутності або недосконалості одного з кроків. До них відносяться, зокрема, оптична конструкція системи, широкий спектр методів виготовлення ДОЕ, тестування елементів та інтеграцію системи в прилад, де кожен крок суттєво відрізняється від процесів, застосованих у суто рефракційних системах.[3]

Успішна оптична конструкція складної системи часто пов'язана з досвідом відповідального інженера. Завдяки абсолютно іншим властивостям дифракційних лінз (ДЛ) порівняно з рефракційними лінзами, наприклад, їх від'ємній дисперсії, властивостям мультифокальності чи залежності від довжини хвилі, змін у оптичній конструкції не уникнути, що іноді призводить до помилок або до повного виходу з ладу системи, що відповідно збільшує час розробки. Крім законів геометричної оптики розробник гібридної системи також має мати вагому базу знань з теорії дифракції та повинен бути досвідчений у використанні дифракційних методів проектування.[3,4]

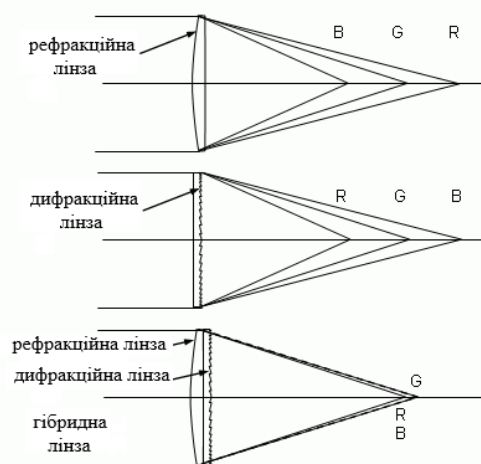


Рисунок 1.1. Відмінності між фокусуванням поліхроматичного світла різними видами лінз (R – червона складова світла, G – зелена складова, B – синя складова)

Технології виготовлення ДЛ в основному поділяються на три категорії: процес освоєння технології, виготовлення інструментів для тиражування, і сам процес тиражування. Для кожної з цих категорій розроблений цілий спектр технологій. Наприклад, для процесу освоєння або для виготовлення обмеженої кількості високоякісних елементів використовуються такі технології, як алмазне точіння, прямий запис лазерним променем, запис електронним променем, літографія, лазерна абляція. Для тиражування можливі наступні технології: лиття під тиском, гаряче тиснення, ультрафіолетове чи точне формування скла. Кожна з цих технологій має певні переваги, але також має свої обмеження, так що вони застосовні лише для конкретних завдань, однак універсальної технології поки немає. Слід зауважити, що впровадження декількох різних технологій є дорогим та трудомістким, тому це часто економічно не виправдано. З початку створення ДОЕ, та впровадження гібридної – дифракційно-рефракційної концепції та пов'язані з цим технології повинні конкурувати з усталеними системними концепціями з налагодженими і затвердженими технологіями, в яких кожна деталь має оптимізуватись роками та десятиліттями.

Гібридна концепція та пов'язані з цим необхідні виробничі процеси повинні подолати всі ці перешкоди. Однак лише поступове вдосконалення усталених технологій виготовлення набагато простіше та потребує менших витрат часу і коштів, ніж впровадження повністю нових технологій.

Наразі ДЛ широко використовуються у багатьох галузях науки, техніки та медицині, чим довели свою функціональну незамінність, а це означає, що використання ДЛ потенційно дозволяє покращити продуктивність системи, яка не може бути реалізована традиційними підходами. Більше того, вартість одного нового елемента системи, як правило, повинна знаходитися в тому ж ціновому діапазоні, що й елемент, який замінюється. Замовники часто не готові платити за новий товар значно більше, ніж за попередній. При впровадженні нових технологічних підходів, наприклад, використанні дифракційної оптики

для формування зображень [5], можливість демонстрації продукту часто обмежується кількома зразками, тож про необхідність у масовому виробництві ДЛ поки мова не йде. Водночас, в офтальмології ДЛ використовують уже багато років як інтраокулярні лінзи для заміни природнього кришталика ока, їх виробництво добре налагоджене і приносить виробникам мільйонні прибутки. Отже, впровадження нових технологій потребує великих грошових затрат, проте має великий потенціал. Необхідні інвестиції в нові технології виготовлення ДЛ, оскільки створення окремо взятих одиничних зразків економічно не вигідно.

1.1.3 Короткий огляд характеристик зарубіжних біфокальних ІОЛ

До нового покоління дифракційно-рефракційних лінз відносять лінзи Acrysof ReSTOR [6] (далі ReSTOR) корпорації «Alcon» із США, AcriLisa німецької фірми «AcriTec» і лінза TecnisZM900 фірми «AMO» (США). Ці лінзи відповідають «золотому» стандарту ринку, який можна звести для цієї категорії лінз до наступних принципів:

- лінзи повинні бути м'якими, щоб імплантувати через малий розріз;
- матеріал лінз обирається гідрофобним (наприклад, акрил чи силікон), щоб мінімізувати біологічні осадження на дифракційному мікрорельєфі і післяопераційні ускладнення;
- додаткова оптична сила, що створюється дифракційною структурою, складає +4 діоптрії, щоб інтенсивність розфокусованого зображення була суттєво нижчою інтенсивності сфокусованого;
- лінза повинна поглинати ультрафіолетове випромінювання для захисту сітківки.

Гібридна мультифокальна лінза AcriLisa (Acri. TecGmbH, Германія) представляє собою монолітну асферичну біфокальну ІОЛ з корекцією аберацій, виготовлену із гідрофобного акрилу. Назва лінзи «LISA» – аббревіатура від слів, що характеризують основні споживацькі властивості лінзи: «L» – енергія світла (Light), що пройшло в робочі нульовий і перший порядки (порядку 82% інтенсивностей у всіх порядках), розподіляється так, що у фокус далекого зору

(рефракційний) попадає 65% і 35% в фокус ближнього зору (обумовлений додатковою оптичною силою дифракційного компонента), «I» – незалежність (Independence), біфокального функціонування від розміру зіниці у зв'язку із повним покриттям світлового поля лінзи дифракційною структурою, «S» – відсутність різких країв рефракційно-дифракційного профілю (Smooth), «A» – оптимізована асферична поверхня рефракційного компонента. Додаткова оптична сила цієї ІОЛ в ближньому фокусі +3,75 D. Лінза придатна для імплантації через дуже малий розріз (менше 2 мм).

Трьохкомпонентна силіконова дифракційна мультифокальна лінза TecnisZM900 (AdvancedMedicalOptics, Inc., США) має діаметр оптичної частини – 6 мм [7]. Дифракційна структура, нанесена на задню поверхню лінзи, забезпечує додаткову оптичну силу в +4.00 D, при цьому падаюче світло рівномірно (по 40,5% від загальної кількості енергії пройденого через лінзу) розподіляється між ближнім та дальнім зором при будь-якому розмірі зіниці. Передня поверхня лінзи має асферичну форму для компенсації аберацій рогівки. Лінза інjektується через розріз 2,8 мм.

Акрилові м'які лінзи ReSTOR [6] випускаються в двох варіантах: монолітному – SA60D3 і трьохкомпонентному – MA60D3. Трьохкомпонентний варіант має оптичну частину і механічно зафіксовані на ній вусики гаптики. Діаметр оптичної частини обох варіантів – 6 мм. Вони інjektуються через розріз від 2,2 до 2,8 мм. «Аподизована» дифракційна структура лінз ReSTOR має оптичну силу +4 D, яка забезпечується 12 дифракційними зонами із глибиною, яка зменшується до периферії. Випускаються 2 моделі, одна з яких поглинає блакитне та ультрафіолетове світло, а інша блокує тільки УФ частину спектру. Крім наявності «аподизації» ця лінза відрізняється від попередніх тим, що не має асферичних поверхонь. На перший погляд це є недоліком, так як застосування асферики дозволяє підвищити просторову роздільну здатність за рахунок аберацій рогівки. На практиці для офтальмологів це обертається суттєво більш жорсткими вимогами на центрування асферичних лінз по оптичній осі ока при імплантації. Однак лінзам ReSTOR властивий інший

недолік: через відносно малий діаметр (порядку 3,6 мм) дифракційної структури вони чутливі до зміщення центра зіниці відносно оптичної осі ока, що часто зустрічається.

1.1.4 Контроль процесу створення ДОЕ

Узагальнений розгляд сукупності традиційних методів контролю та досліджень оптичних систем і елементів дає підстави стверджувати, що всі методи зводяться до реєстрації структури хвильового фронту, сформованого системою в схемі контролю [8]. Наступний крок – дослідження цієї структури, яка візуалізується у формі зображення того чи іншого виду (назвемо його оптико-електронним зображенням), наприклад, у вигляді інтерференційних смуг, тіньової картини, сукупності плям, що складають діаграму Гартмана, дифракційних зображень точки чи лінії, що світиться, та інші.

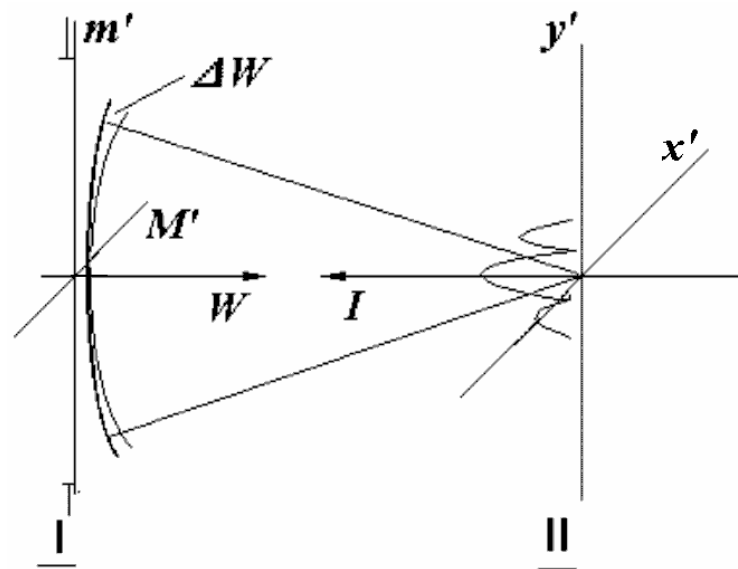


Рисунок 1.2. – Узагальнена схема комплексу методів оптичних вимірювань та досліджень

Під узагальненою схемою розуміється точкове джерело випромінювання, із якого сферичний хвильовий фронт розповсюджується у вхідну зіницю оптичної системи. Хвильовий фронт, перетворений досліджуванним об'єктом у вимірювальній схемі, вписаний у вихідну зіницю (рисунок 1.2). Структура хвильового фронту, що характеризує якість досліджуваної системи, може бути представлена функцією просторових координат на зіниці чи на предметі.

Розглянемо хвильовий фронт, сформований досліджуваним оптичним елементом контролю (рисунок 1.2).

Тут M' та m' – координати на вихідній зіниці оптичного елемента в схемі; x' та y' – координати в площині зображення тест-об'єкту; W – координата форми хвильового фронту; I – відносна освітленість у зображенні тест-об'єкту.

Дослідження оптичного елемента здійснюється, головним чином, в двох зонах:

1. У зоні зображення II ; об'єктом дослідження служить, у більшості випадків, амплітудна характеристика випромінювання – двовірний розподіл освітленості в площині зображення, який характеризує концентрацію енергії в зображенні та повноту передачі інформації про структуру об'єкта, що зображується.

Тут формується *оптичне вимірювальне зображення першого роду*. Воно подібне об'єкту і несе інформацію в першу чергу про його геометричних параметрах та зовнішню структуру.

2. У зоні зіниці I ; об'єктом дослідження служить, найчастіше, фазова характеристика хвильового фронту, а саме – відхилення ΔW форми фронту хвилі від форми, що відповідає потрібній якості зображення (найчастіше – від сферичної форми).

Тут формується *оптичне вимірювальне зображення другого роду*. Зазвичай воно не подібне об'єкту, але несе інформацію про характер хвильового фронту з боку його фазових деформацій, про аберації досліджуваних оптичних систем та елементів та про помилки форми оптичних поверхонь.[8]

Відомості про структуру зображення, побудованого оптичною системою, можуть бути отримані двома шляхами – прямим і непрямим.

Прямі способи оцінки якості зображення полягають в спостереженні тест-об'єкту, сформованого за допомогою досліджуваної системи в зоні II (зоні зображення), і вимірюванні фотометричної структури цього зображення, тобто визначення функції розсіювання (наприклад, функції розсіювання точки ФРТ

чи функції розсіювання лінії ФРЛ). Функції розсіювання та пов'язані з ними оптична передаточна функція ОПФ, функція передачі модуляції ФПМ і функція концентрації енергії в зображенні точкового тест-об'єкту служать на практиці кількісними характеристиками якості зображення оптичної системи.

Непрямі способи оцінки якості зображення полягають у вимірюванні структури деформацій хвильового фронту в зоні I (зоні зіниці), на виході оптичної вимірювальної схеми, і наступному обчисленні, на основі отриманої карти хвильового фронту, функцій, описуючих структуру і якість оптичного зображення.[8]

Переваги непрямих методів полягають в тому, що вони дозволяють по відомій топографії відхилень фронту хвилі розрахувати більшість характеристик якості зображення (таких, як модуляційна передаточна функція, ФПМ, чи функція концентрації енергії, ФКЕ). Непрямі методи дають можливість визначити вплив конкретних спотворень хвильового фронту, що вносить система, на якість зображення).[8]

1.2 Експериментальне дослідження ДОО

Контроль параметрів ДОО включає в себе дослідження:

1. Дослідження енергетичної ефективності.
2. В залежності від призначення ДОО – розподіл енергії в фокальній площині чи точність створення хвильового фронту, чи відповідність діаграми направленості випромінювання заданої, чи відповідність модовому складу, що проектується.

Враховуючи різне функціональне призначення ДОО, використовують різноманітні оптичні схеми, пристрої введення і програмні продукти для проведення дослідів. Розглянемо типові схеми для контролю характеристик ДЛ та ІОЛ.

1.2.1 Схема установки для контролю ІОЛ 1 [12].

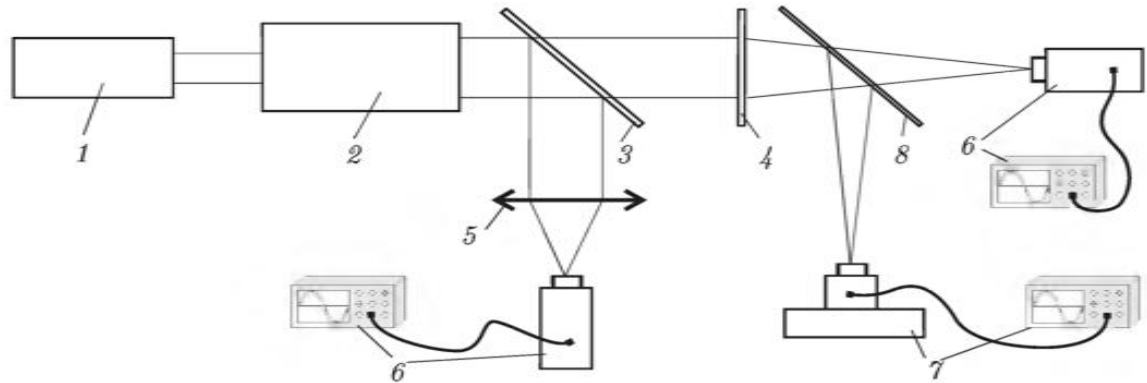


Рисунок 1.3. – Оптична схема установки для дослідження ІОЛ

При дослідженні компенсатора використовують схему, зображену на рисунку 1.3. При дослідженні фокусаторів іншого спектрального діапазону використовують джерела світла відповідного діапазону і засоби реєстрації сфокусованого випромінювання, інше оснащення. На рисунку 3 представлений загальний вигляд установки.

Оптична схема для тестування фокусаторів ближнього ІЧ-діапазону включає в себе: NdGr-лазер безперервного випромінювання з довжиною хвилі 1,06 мкм і максимальною потужністю 4 Вт – 1; кварцовий коліматор – 2; ділильне скло – 3; фокусатор – 4; лінзи – 5; давач піроватметра – 6; телекамера з монітором – 7. Інформація з піроватметрів і камери подається і обробляється на персональному комп'ютері, що керує також прецизійним пристроєм переміщення давачів в площині фокусування. Випромінювання лазера 1, пройшовши коліматор 2, падає на фокусатор 4, який фіксує лазерне випромінювання в площині приймача піроватметра 6. При цьому частина випромінювання, відібрана ділильною пластинною 3, фокусується об'єктивом телекамери 7.

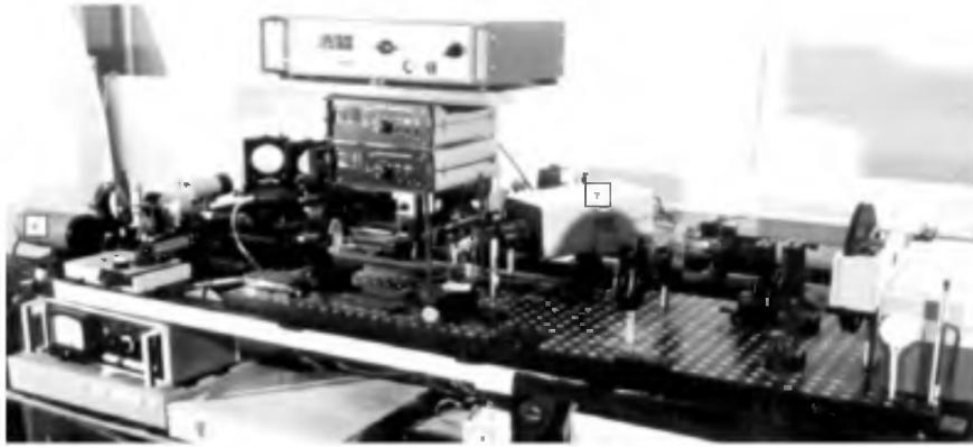


Рисунок 1.4. – Загальний вигляд лазерного стану із вимірювальною оптичною системою

Вимірювання проводяться в площинах: безпосередньо перед фокусатором, для чого служать дзеркало 3 і лінза 5, що встановлюються для вимірювання інтенсивності падаючого пучка; безпосередньо після фокусатора для визначення ступеню поглинання лазерного випромінювання матеріалом підкладки фокусатора; і в площині фокусування лазерного випромінювання на давачі пірватметра 6. Відношення інтенсивностей сфокусованого випромінювання до інтенсивності випромінювання одразу після фокусатора дає уявлення про ефективність роботи фокусатора з точки зору технології виготовлення мікрорельєфу; відношення інтенсивностей сфокусованого і падаючого пучків дає загальну енергетичну ефективність фокусатора, враховуючи поглинання випромінювання матеріалом підкладки і відбиття частини випромінювання від поверхонь фокусатора. Завдяки засобам автоматизації, можна не тільки із високою точністю вимірювати інтенсивність лазерного пучка, що пройшов через фокусатор, і порівнювати її з інтенсивністю падаючого випромінювання, але також аналізувати розподіл інтенсивності в області фокусування пучка за допомогою телекамери.

Програмно-апаратні засоби дослідження фокусаторів включають в себе оригінальні частини, які дозволяють проаналізувати розподіл інтенсивності вздовж складної лінії фокусування (або в заданій плоскій області – у випадку фокусування в плоску область) і оцінити на цій основі енергетичну

ефективність ДОЕ. Для цього програмно (або апаратно) відстежують долю енергії, що потрапляє в задану ділянку фокальної області, яку визначає дослідник на основі даних про конфігурацію області досліджуваного ДОЕ.

1.2.1 Схема установки для контролю ІОЛ 2

Найважливішою характеристикою є сила ІОЛ, яка відображає її здатність фокусувати зображення на сітківці. Вимірявши ефективну фокусну відстань (ЕФВ) зразка (рисунок 1.4), можна розрахувати і його силу. ЕФВ можна виміряти в повітрі або в місці використання моделі ока згідно з ISO 11979. Важливою складовою оцінки якості ІОЛ є аналіз оптичних аберацій, шляхом дослідження хвильового фронту. У результаті аналізу можна отримати інформацію про сферичну аберрацію, кому, астигматизм, дефокусування і кривизну поля. Вимірювання хвильового фронту дає також можливість визначити відхилення від конструкції лінзи. Ще одним параметром, необхідним для характеристики ІОЛ, є функція передачі модуляції. Вона може бути виміряна безпосередньо на основі аналізу функції розсіювання точки або лінії, або шляхом розрахунку його з вимірюваного хвильового фронту. [10]

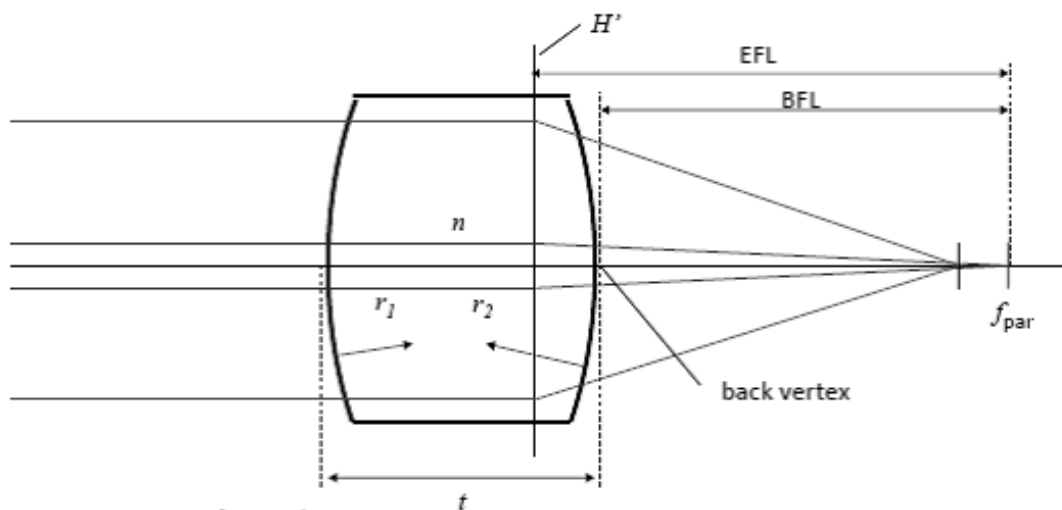


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення ІОЛ

Оптична установка (рисунок 1.6.) розроблена у відповідності з ISO 11979[9] представлена в роботі [10]. Коліматор проектує зображення міри у безкінечність. Паралельний пучок проходить через ІОЛ, а потім пучок, який сходиться, фокусується у фокальній площині. Зображення міри збирається

об'єктивом мікроскопа і направляється на ПЗЗ-матрицю цифрової камери з високою роздільною здатністю. У якості кріплення для лінзи використовується тримач, який розміщується на предметному столику. Обробка інформації виконується комп'ютером із відповідним програмним забезпеченням [10].

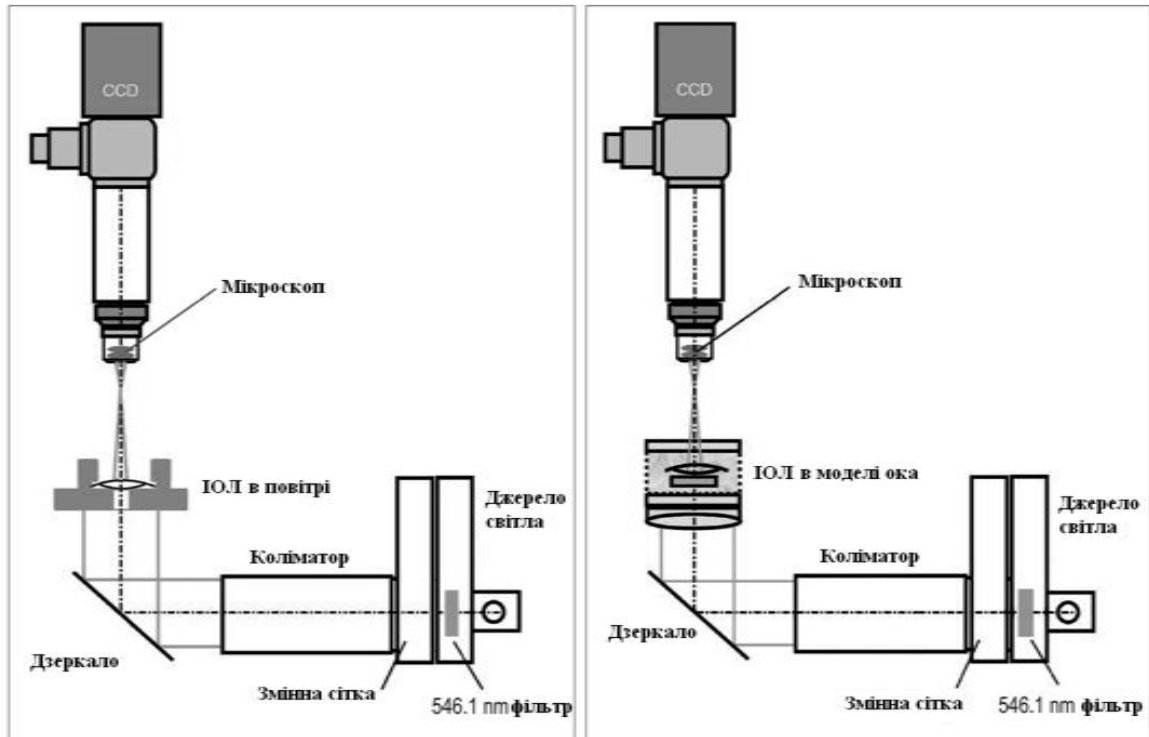


Рисунок 1.6. – Установа для тестування ІОЛ

1.2.2 Схема установки для контролю ІОЛ 3

У статті [11] описана установка для вимірювання фокусної відстані ІОЛ (рисунок 1.7). Паралельний пучок від лазера 1 освітлює ІОЛ, фокусна відстань при цьому вимірюється за квіткою в повітрі, як різниця між показниками мікроскопа, коли він спрямований на поверхню об'єктива і на сфокусоване зображення точкового джерела.

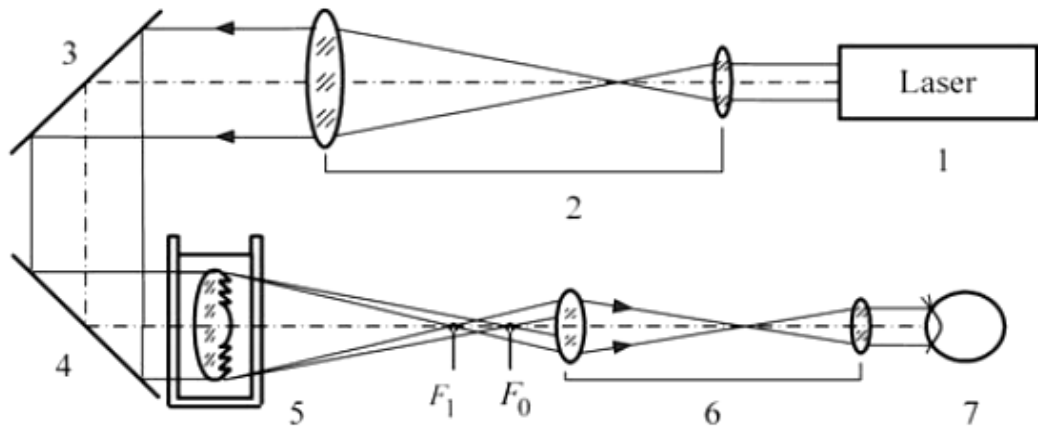


Рисунок 1.7 – Система для вимірювання фокусної відстані: 1 – лазер, 2 – коліматор, 3,4 – заломлюючі дзеркала; 5 – кювета наповнена дистильованою водою і ІОЛ; 6 – мікроскоп, 7 – око

Перевагами цього методу є, по-перше, відсутність необхідності калібрування шкали, по-друге – форма розподілу інтенсивності в фокальній площині свідчить про наявність або відсутність сферичних, астигматичних та інших аберацій. [11]

На рисунку 1.8 представлена система для вимірювання дифракційної ефективності ІОЛ. У загальному випадку, ефективність залежить від форми і глибини профілю дифракційної структури, а також від втрат на відбиття, поглинання і розсіювання світла. [11]

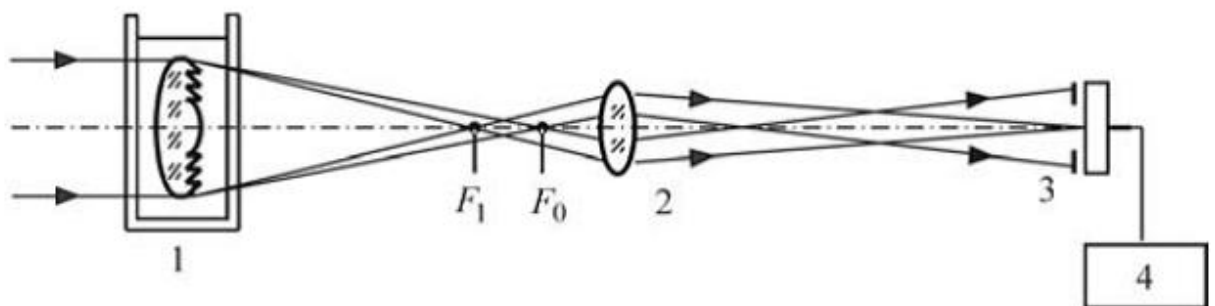


Рисунок 1.8 – Система для вимірювання дифракційної ефективності: 1 – кювета з дистильованою водою та ІОЛ, 2 – мікроскоб'єктив, 3 – фотодіод з діафрагмою, 4 – мікрометр

1.2.3 Вимірювання оптичних характеристик ДОЕ

Кінцева перевірка виготовлення ДОЕ полягає у вимірюванні його ефективності. Наприклад, можна вимірювати розподіл інтенсивності у зображенні точкового джерела випромінювання або у фокальній площині дифракційної лінзи. Необхідно також застосовувати додаткові методи вимірювання, які враховують інші ефекти, наприклад, зміну поляризації світла, що пройшло через ДОЕ. Існує значна кількість методів вимірювання оптичних характеристик дифракційних елементів. Розглянемо один із них.

Рефрактометри. В даному розумінні рефрактометри – це прилади, які вимірюють кількість світла на певній ділянці, і світла, яке потрапило в інші місця [12]. На рисунку 1.9 наведена схема такого рефрактометра. Колімований пучок світла, сформований поза осьовим параболічним дзеркалом, проходить через досліджуваний елемент. Скануючий приймач випромінювання з точковою польовою діафрагмою вимірює розподіл освітленості у ближній або дальній зонах. Процес вимірювання контролюється комп'ютерною програмою LabView. Точність вимірювання залежить від розмірів польової діафрагми і кроком сканування приймача[12].

В сучасних рефрактометрах замість скануючого ПВ часто використовують прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) у вигляді матриці. Це дозволяє вимірювати двовимірний розподіл освітленості у площині аналізу в реальному часі без використання механічного сканування. Електричний сигнал кожного пікселя матриці, який пропорційний освітленості цього пікселя, квантується по амплітуді й представляється у вигляді цілого числа, яке знаходиться в межах від нуля (нульова освітленість) до верхнього значення динамічного діапазону (зазвичай від 256 до 65536 або від 8 до 16 біт). Масив чисел використовується для реконструкції освітленості площини аналізу і дозволяє застосовувати комп'ютер для дослідження ДОЕ [12].

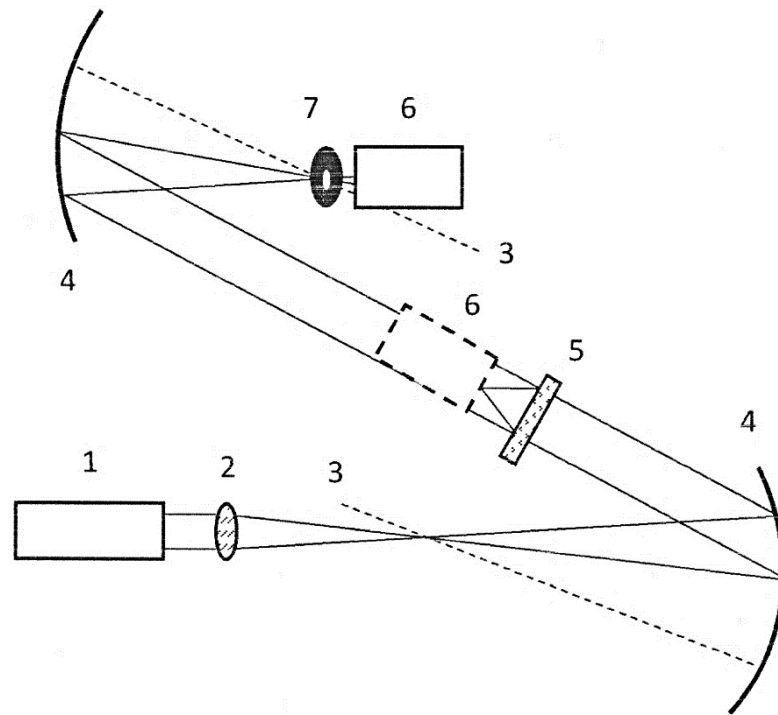


Рисунок 1.9 –Схема рефрактометра, призначеного для вимірювання освітленості, що сформована ДОЕ у ближній та дальній зонах: 1 – лазер; 2 – лінза; 3 – оптична вісь дзеркала; 4 – параболічне дзеркало; 5 – ДОЕ для тестування; 6 – скануючий ПВ; 7 – точкова діафрагма

При використанні ПЗЗ-матриць для вимірювання характеристик ДОЕ необхідно враховувати ряд факторів. Розмір матриці складає декілька міліметрів, що обмежує область вимірювання. Крім того, точність вимірювань обмежена розміром пікселя. Для підвищення точності вимірювань зображення із фокальної площини ДОЕ переноситься на матрицю із збільшенням за допомогою мікрооб'єктива. Необхідно також враховувати обмежений динамічний діапазон і спектральну чутливість ПЗЗ-матриці[12].

1.2.4 Вимірювання дифракційної ефективності ДОЕ за багатьма порядками дифракції

Оптична схема пристрою для вимірювання ДЕ показана на рисунку 1.10. В основі вимірювальної системи лежить скануючий метод вимірювання. Згідно даному методу робоча поверхня ДОЕ умовно розділюється на N локальних площадок s_i , розміри яких визначаються розмірами світлової плями, послідовно сканую чою поверхню елемента. При освітленні локальної ділянки світло

дифрагує на його мікроструктурі. Інтенсивність I_{out} вимірюється і нормується на поточне значення інтенсивності падаючого світла I_{in} пропускання підкладки T_{sub} . В результаті нормування отримують значення ДЕ в локальній вимірній площадці ДОЕ: $\eta_i = I_{out}/T_{sub}I_{in}$, оскільки величина $T_{sub}I_{in}$ дорівнює інтенсивності світла, яке проходить через елемент. Зіставивши значення η_i з координатами площадок, можна отримати розподіл ДЕ по всій площі ДОЕ[13].

Пристрій працює наступним чином: скануючий пучок світла, що генерується лазерним модулем 1 (можуть використовуватися напівпровідникові лазерні модулі з довжиною хвилі від 405 до 850 нм, монохроматор або будь-які інші типи лазерів), фокусується об'єктивом 4 на поверхню досліджуваного ДОЕ 5, утворюючи світлову пляму сі. Дифрагованим світло потрапляє на матовий екран 7, звідки за допомогою об'єктива 9 проєктується на матрицю цифрової відеокамери 10. Використання матового екрану дозволяє розширити можливу робочу область і проводити вимірювання відразу в декількох ДП. Таке рішення дозволяє виключити накладення ДП один на одного і зменшити вплив захисного скла відеокамери. Сканування поверхні відбувається за рахунок переміщення ДОЕ щодо лазерного пучка. Переміщення здійснюється за допомогою двокоординатного пристрою позиціонування по заданій траєкторії з заданим кроком. У кожній точці траєкторії камери здійснює захоплення і передачу зображення керуючому комп'ютеру, який робить аналіз зображень, розраховує значення ДЕ для кожного дифракційного порядку кожної точки траєкторії і представляє результати вимірювання в зручному для користувача вигляді[13].

Частина скануючого випромінювання за допомогою світлоділник 2 рисунок 1.10 направляється до фотоприймача 3, сигнал якого оцифровується і передається керуючому комп'ютера. Це необхідно для забезпечення контролю флуктуації потужності лазерного модуля 1, управління яким також здійснюється комп'ютером. Фазова пластинка 11 вводиться для обертання площини поляризації, коли необхідно досліджувати вплив поляризації випромінювання на ДЕ ДОЕ[13].

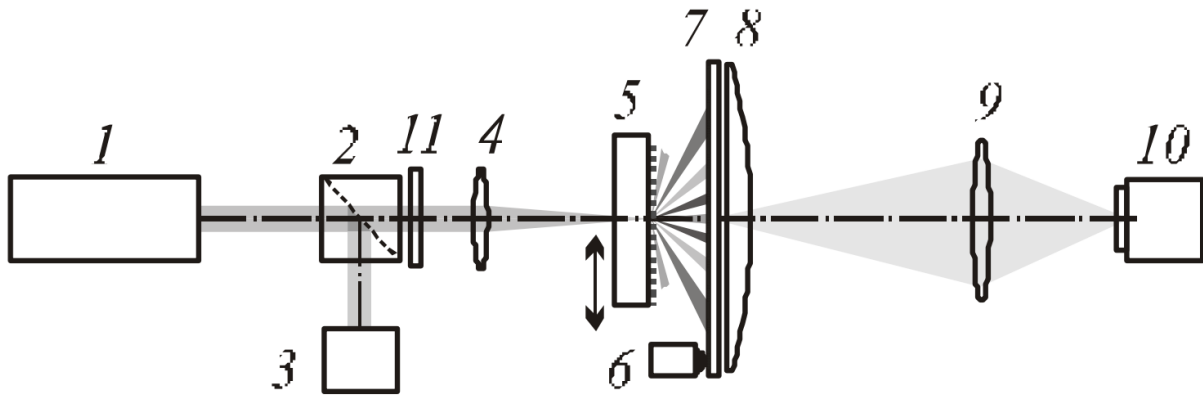


Рисунок 1.10 - Оптична схема пристрою для вимірювання, де:

1 - лазерний модуль, 2 - світлоділник, 3 - фотоприймач, 4 - фокусується лінза, 5 - досліджуваний ДОЕ, 6 - модуль оптичної калібрування, 7 - матовий екран, 8 - колективна лінза, 9 - об'єктив, 10 - цифрова камера, 11 - фазова пластинка

Колективна лінза 8 в оптичній схемі вимірювальної системи необхідна для коригування діаграми спрямованості дифрагованого світла. Пристрій для вимірювання ДЕ зі звичайною 8-бітною відеокамерою дозволяє виміряти розподіл ДЕ у всіх видимих ДП по всій площі ДОЕ з розмірами $100 \times 100 \text{ мм}^2$ в динамічному діапазоні(ДД) зміни інтенсивності 255 градацій. Такий діапазон обумовлений типом використовуваної відеокамери, і його, як правило, недостатньо для точноговимірювання ДЕ. Для розширення ДД необхідно використовувати дорогі 12-14-бітові відеокамери але це не рентабельно оскільки є більш економічно обґрунтовані методи розширення ДД. Слід зазначити, що застосування відеокамер з ДД більше 10 біт не завжди виправдано, так як через низьку швидкості зміни кадрів час вимірювання ДЕ буде занадто великим[13].

Існують обмеження на типи ДОЕ, параметри яких можна вимірювати цим пристроєм. Так як сканування досліджуваного зразка проводиться сфокусованим пучком світла (діаметр плями близько 0,15 - 0,25 мм), характерний період дифракційної структури повинен бути в кілька разів менше розмірів цього пучка і апроксимувати дифракційними ґратами. Такимчином,

вимірювання параметрів ДОЕ типу зонних пластинок буде утруднено в області центру, де період дуже великий. Крім того, через великі кути дифракції вимірювання параметрів ДОЕ з періодом порядку довжини хвилі можливо тільки для нульового порядку дифракції[13].

1.3 Огляд аналогів

Характеристики ДЛ мають бути визначені надзвичайно точно, адже подальше їхнє використання пов'язане зі здоров'ям людини. Тому треба детально розглянути готові прилади для дослідження різних характеристик ІОЛ.

- 1) Прилад ImageMaster®VISION показаний на рисунку 1.11. Оцінює якість зображення офтальмологічних елементів за модуляційною передавальною функцією. Також є можливість для визначення функції розсіювання лінії, функції передачі фази, оптичної сили та астигматизму. Акомодація та адаптація людського ока можуть бути змодельовані за допомогою ImageMaster®VISION: вимірювальна головка фокусується для симуляції акомодації ока у діапазоні ± 10 дптр і змінюється апертура детектора для імітації адаптації ока[14].



Рисунок 1.11 – Загальний вигляд приладу ImageMaster®VISION

- 2) Прилад OptiSpheric®IOL показаний на рисунку 1.12. Дозволяє вимірювати всі важливі характеристики ІОЛ у відповідності зі стандартом ISO 11979. Для будь-якого типу інтраокулярних лінз – монофокальних, мультифокальних, торичних; з будь-яким типом

структури – рефракційних, дифракційних. Прилад вимірює у повітрі або в моделі ока: ефективну фокусну відстань, функцію передачі модуляції, функцію розсіювання точки, радіус кривизни та задню фокусну відстань [15].



Рисунок 1.12 – Загальний вигляд приладу OptiSpheric®IOL

- 3) Прилад IOLAPlus показаний на рисунку 1.13. Система цього приладу використовує унікальну технологію, яка дозволяє отримувати об'єктивні й точні виміри всіх типів рефракційних ІОЛ в повітрі та спеціальному розчині. Прилад чітко показує форму профілю лінзи та найменші відхилення та дефекти встановленого дизайну, включаючи будь-які аберації [16].



Рисунок 1.13 – Загальний вигляд приладу IOLAPlus

- 4) Прилад OptikosIOL-5000 призначений для вимірювання оптичних властивостей ІОЛ (рисунок 1.14): модуляційної передавальної функції, ефективної фокусної відстані, функції розсіювання лінії та різних аберацій. Система аналізу зображення може тестувати як монофокальні так і мультифокальні ІОЛ та відповідає стандарту ISO 11979 [17].

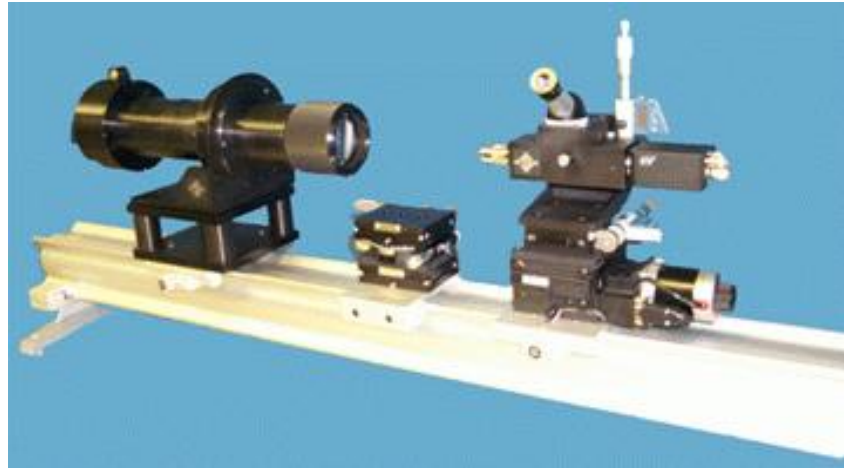


Рисунок 1.14 – Загальний вигляд приладу IOL-5000

- 5) Модель Metricon 2010/M показана на рисунку 1.15 використовує передові методики на основі світловодного ефекту для швидкого і точного вимірювання, як товщини, так і показника заломлення/подвійного променезаломлення діелектричних і полімерних плівок. Модель 2010/M пропонує унікальні переваги в порівнянні з традиційними вимірювальними інструментами на основі еліпсометрії і спектрофотометрії [18].



Рисунок 1.15 – загальний вигляд приладу Metricon 2010/M

- 6) NimoTR0815 показаний на рисунку 1.16 заснований на принципі «Phase-shifting Schlieren» призначений для вимірювання оптичної

силіричних типів ІОЛ: мультифокальних, торичних в одному приладі і функції передачі модуляції, в діапазоні ± 100 дптр.



Рисунок 1.16 – загальний вигляд приладу NimoTR0815

Порівняти функціональні можливості вищерозглянутих приладів можна за допомогою таблиці 1.1. Як видно з таблиці, всі прилади здатні вимірювати модуляційну передавальну функцію, а також основні оптичні параметри ДЛ та ІОЛ, які будуть розглянуті в наступному розділі [19].

Таблиця 1.1 – Таблиця для порівняння аналогів

Виробник	Модель	Вимірюється
TRIOPTICS (Німеччина)	ImageMaster®VISION	МПФ, оптична сила, функція фазового переносу, астигматизм.
	OptiSpheric®IOL	МПФ, ефективна фокусна відстань, задній фокальний відрізок, радіус кривизни.
Rotlex Optics (Ізраїль)	IOLA Plus	МПФ, форма профілю, дефекти, аберації.

Optikos (Великобританія)	IOL-5000	МПФ, оптична сила, ефективна фокусна відстань, кривизна поля, хроматичні аберації.
Metricon (Австралія)	2010/M	МПФ, товщина плівки, показник заломлення, подвійне променезаломлення
LAMBDA-X (Бельгія)	NimoTR0815	МПФ, оптична сила для мультифокальних і торичних ІОЛ

1.4 Мета і завдання дослідження

У даній магістерській дисертації розглядаються методи дослідження характеристик дифракційних лінз.

Метою дослідження є розробка стенду для вимірювання характеристик дифракційних лінз. Проаналізувавши відомі аналоги, для розробки стенду були визначені такі завдання:

1. Розробка оптичної схеми та конструкції стенду;
2. Розробка функціональної схеми стенду;
3. Розробка порядку вимірювань характеристик лінз.

Об'єктом дослідження є процес формування зображення на дифракційній лінзі.

Предметом дослідження є вимірювання характеристик дифракційних лінз.

1.4 Висновок до розділу 1

У першому розділі були розглянуті сучасні прилади для вимірювання оптичних характеристик дифракційних лінз, визначено мету, об'єкт та предмет дослідження.

Оскільки конструкція дифракційних лінз швидкими темпами ускладнюється, тому є актуальною тема розробки приладів для визначення усіх необхідних оптичних характеристик, з використанням усіх сучасних методів

збору і обробки інформації. В основу розробки було взято схему приладу №2, оскільки вимірювання керується міжнародним стандартом ISO 11979 і її легше реалізувати в заданих умовах.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ

У зв'язку з постійним ускладненням конструкції інтраокулярних лінз, а також особливими вимогами до точності їх виготовлення, необхідно мати достатньо потужний інструмент для дослідження таких лінз. Тому постало завдання розробити новий прилад, який не поступається відомим аналогам та має значні переваги. Після розгляду декількох альтернативних методів для спрощення процедури вимірювань обрано оптичну схему та конструкцію стенду. Запропоновано стенд для вимірювання характеристик інтраокулярних лінз, таких як: задня вершинна рефракція, ефективна фокусна відстань, роздільна здатність лінзи, модуляційна передавальна функція. Нововведенням є використання USB-мікроскопа та розташування всіх елементів стенду на одній осі, що значно спрощує юстування приладу. Подальша робота спрямована на дослідження конкретних інтраокулярних та дифракційних лінзах за допомогою створеного стенду.

2.1 Класифікація дифракційних оптичних елементів

Перш ніж приступити до методу вимірювання, розглянемо, що саме доведеться досліджувати. Класифікують дифракційні оптичні елементи (ДОЕ)[18] по типу дифракційної структури, по формі робочої поверхні, на якій створена структура, по виду перетворення хвильового фронту [19]. Дифракційна структура може працювати на пропускання або на відбиття, здійснюючи амплітудну або фазову модуляцію падаючої хвилі. При цьому промені, які утворені за рахунок дифракції світла, розташовуються з двох сторін відносно променів, що не приймають участі в дифракції (промені нульового порядку). Порядок дифракції відраховується від нульового. Як правило, додатні справа, а від'ємні зліва [8].

Історично першими ДОЕ були плоскі дифракційні ґратки із структурою у вигляді прямолінійних періодичних структур [20]. ДОЕ із структурою, подібною до структури зонної пластинки Френеля, називають *дифракційними лінзами*. Амплітудна зонна пластинка була запропонована О. Френелем на початку XIX століття. Її структура являє собою послідовно розташовані прозорі та непрозорі концентричні кільцеві зони, радіуси границь яких пропорційні кореню квадратному із цілих чисел (рисунок 2.1). Така пластинка по дії еквівалентна декільком додатнім і від’ємним лінзам, які розташовані в одній апертурі. В 1898 році Р. Вуд вперше виготовив фазоінверсну пластинку. Зонна пластинка з фазовим профілем зон називається *кінофорумом* [8].

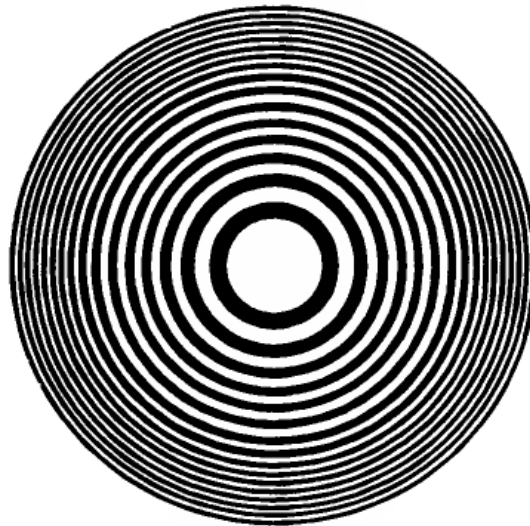


Рисунок 2.1 – Зонна пластинка Френеля

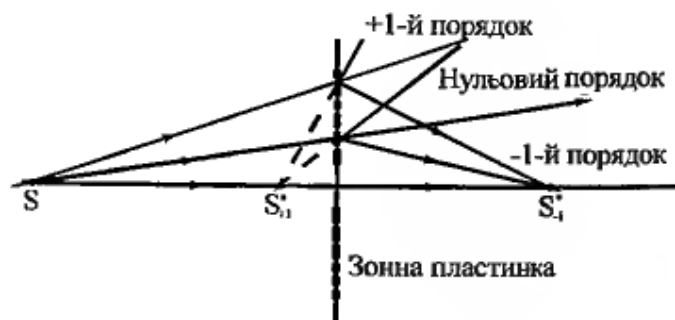


Рисунок 2.2 – Фокуруючі властивості зонної пластинки

Зонна пластинка виконує функцію фокусування світла і діє подібно до лінзи, яка має велику кількість фокусів, що відповідають різним порядкам

дифракції і розташовані на осі розповсюдження світла. Фокусні відстані зонної пластинки визначаються за формулою (2.1):

$$f_m = \frac{f_1}{2m + 1} \quad (2.1)$$

Інтенсивність світла на відстані (2.1) від зонної пластинки зменшується із збільшенням порядку дифракції m по закону [8]:

$$I_{2m+1} = \frac{4}{\pi^2} \frac{I_0}{(2m + 1)^2} \quad (2.2)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого світла.

В 1967 році Ломан А.В. і Паріс Д.П. запропонували двовимірні (2D) дифракційні ґратки із змінними зонами Френеля, які можна отримати на основі муарових ефектів в результаті суперпозиції двох синтезованих масок. Наприклад, якщо записати на одній пластинці дві схрещених циліндричні лінзи з різними фокусними відстанями, то такий ДОЕ дозволяє отримати зображення відрізка, що лежить в площині, перпендикулярній до осі розповсюдження паралельного пучка світла [8].

Як правило, дифракційна оптика розглядає такі елементи:

- ✓ *Дифракційний оптичний елемент* – це компонент, який змінює хвильовий фронт шляхом сегментації та зміни напрямку розповсюдження сегментів завдяки інтерференції та контролю фази.
- ✓ *Кіноформ (Kinoform)* – це ДОЕ, в якого контрольована фазова поверхня плавно змінюється.
- ✓ *Бінарна оптика (BinaryOptic)* – це ДОЕ з дискретним числом контрольованих фазових поверхонь. Найбільш простий елемент, що виготовляється за допомогою однієї літографічної маски, має тільки дві поверхні, які вносять нульову або π різницю фаз до фронту падаючої хвилі. При використанні N масок можна створити багаторівневу бінарну оптику, яка має 2^N рівнів фази.

- ✓ *Комп'ютерна голограма (Computer – Generated Hologram)* – це ДОЕ, який створений в результаті розрахунків інтерференційної картини з певним набором фазових хвиль або розрахунку амплітудно-фазової маски.
- ✓ *Голографічний оптичний елемент (Holographic Optical Element)* – це ДОЕ, що створений в результаті інтерференції двох хвильових фронтів, створених оптичними компонентами, які будуть використовуватися в якості оптичних компонентів.
- ✓ *Багатопорядкові дифракційні лінзи.*

2.2 Інтраокулярна лінза

Сьогодні існує велика різноманітність преміум-класів на вибір. Найкращий інтраокулярний об'єктив для вас залежить від багатьох факторів, включаючи ваш спосіб життя та ваші особливі візуальні потреби.

Нижче наведено огляд преміальних ІОЛ в даний час, які затверджені FDA для використання хірургами катаракти в США. Вони вважаються "преміальними" внутрішньоочними лінзами, оскільки вони мають додаткові функції, крім тих, що знаходяться в основних ІОЛ-системах, які охоплюються Medicare та іншими видами медичного страхування.

Під час проведення вами передопераційного іспиту та консультації ваш хірург з катарактом може допомогти вам вибрати найкращий ІОЛ для ваших потреб, а також додаткові витрати на хірургічну катаракту, якщо ви оберете один з наступних імплантатів лінз-преміум [20].

2.2.1 Асферичні ІОЛ

Традиційні внутрішньоочні лінзи мають сферичний оптичний дизайн, тобто фронтальна поверхня рівномірно вигнута від центру об'єктива до її периферії. Незважаючи на те, що сферичний ІОЛ відносно легко виготовляється, ця конструкція не імітує форму природної лінзи всередині ока,

яка коливається в кривизни від центру до периферії. Іншими словами, природна лінза ока є асферичною ("не сферичною").

Чому це важливо?

Сферична інтраокулярна лінза може викликати незначні оптичні недосконалості, які називаються аберациями більш високого ступеню (HOAs), які можуть впливати на якість зору, особливо в умовах слабкого освітлення, таких як ведення водіння вночі.

З іншого боку, преміум-асферичні ІОЛ поєднуються більш точно з формою та оптичною якістю природного об'єктива очей і тим самим можуть забезпечити більш чітке бачення, особливо в умовах недостатнього освітлення та для людей з великими учнями.

Популярні асферичні ІОЛ, які затверджені FDA та доступні в США, включають: Tecnis Aspheric (Abbott Medical Optics), AcrySof IQ (Alcon), SofPort AO (Bausch + Lomb) та Softec HD (Lenstec) [20].

2.2.2 Торичні ІОЛ

Торичні ІОЛ - це преміальні інтраокулярні лінзи, які коректують астигматизм, а також короткозорості або далекозорість.

Як торичні м'які контактні лінзи, торичні ІОЛ можуть виправити астигматизм, оскільки вони мають різні сили в різних меридіанах об'єктива. Вони також мають відмітки вирівнювання на периферійній частині об'єктива, які дозволяють хірургу регулювати орієнтацію ІОЛ усередину ока для оптимальної корекції астигматизму.

Незадовго до операції з катаракти хірург розміщує тимчасові мітки на рогівці пацієнта, які визначають розташування самого криволінійного меридіана передньої частини ока. Тоді, коли імплантована торична ІОЛ під час процедури катаракти, хірург обертає ІОЛ, так що позначення на ІОЛ вирівняні з маркуваннями рогівки, щоб забезпечити правильну корекцію астигматизму.

До розробки торичних ІОЛ, хірургам катаракти довелося провести процедуру виклику лімбал-розслабляючих розрізів (LRI) для виправлення

астигматизму під час чи після операції катаракти. У ЛРІ невеликі розрізи виготовляються на протилежних кінцях рогівки, дуже близько від переходу між роговицею і навколишнім білим склером. (Цей з'єднання називається лімбом.) Коли ці подрізки зцілюються, рогівка стає більш сферичною за формою, зменшуючи або усуваючи астигматизм.

У деяких випадках - навіть коли використовується торичний ІОЛ - лімбальні розслабляючі розрізи можуть знадобитися після хірургічного втручання катаракти, щоб повністю астигматизувати. Але зазвичай в таких випадках кількість астигматизму, що залишається після імплантації торичного ІОЛ, набагато менша, що робить кращий результат LRI більш імовірним.

ЛАСІК, ПРК та процедура, що називається астигматичною кератотомією (АК), також може бути виконана після хірургічної операції по катаракту для виправлення залишкового астигматизму, але торичні ІОЛ зменшують ймовірність необхідності проведення цих додаткових хірургічних операцій.

В США доступні торичні внутрішньоочні лінзи, що включають: Tecnis Toric (медична оптика Abbott), AcrySof IQ Toric (Alcon) і Trulign Toric (Bausch + Lomb) [20].

2.2.3 Допоміжні ІОЛ

Звичайні сферичні ІОЛ є монофокальними лінзами, а це означає, що вони призначені для забезпечення чіткого бачення в одному фокусному центрі (як правило, далеко для гарного водіння, наприклад). З звичайними ІОЛ, як правило, ви повинні носити окуляри або контактні лінзи, щоб користуватися комп'ютером, читати чи виконувати інші завдання великого розміру в розтяжку.

Приміщення ІОЛ - це преміальні внутрішньоочні лінзи, які розширюють діапазон чіткого зору як з асферичним дизайном, так і з гнучкими "гаптіками" - опорними ногами, що тримають ІОЛ на місці всередині очей. Ці гнучкі ноги дозволяють розміщуванню ІОЛ рухатися вперед трохи, коли ви дивитесь на

близькі об'єкти, що збільшує силу фокусування ока достатньо, щоб забезпечити краще ближнє видовище, ніж звичайний монофокальний лінз.

Приміщення ІОЛ може не забезпечити той самий рівень збільшення для ближнього зору, який виконує багатофокусний ІОЛ. Але багато людей вважають, що ці преміальні ІОЛ суттєво зменшують потребу в окулярах чи комп'ютерних окулярах після операції з катаракцією, забезпечуючи винятково чітке відстань від зору, аналогічні тому, що пропонується монофокальною ІОЛ.

Популярні ІОЛ, доступні в США, включають Crystalens АО та Trulign Toric ІОЛ, які виготовлені Vausch + Lomb. (Трулін Торич лінзи виправляє астигматизм, а також пресбіопію.) [20]

2.2.4 Мультифокальні ІОЛ

Мультифокальні ІОЛ є ще однією категорією ІОЛ для корекції пресбіопії, яка може знизити вашу потребу в окулярах або комп'ютерних окулярах після операції з катаракцією.

Як і багатофокусні контактні лінзи, ці преміальні ІОЛ містять додаткове збільшення в різних частинах об'єктива, щоб розширити свій діапазон зору, щоб можна було чітко бачити об'єкти на всіх відстанях без окулярів або контактних лінз.

Деякі дослідження показали, що мультифокальні ІОЛ, як правило, забезпечують краще ближнє зору, ніж розміщення ІОЛ, але вони, швидше за все, можуть викликати відблиски або слабе розмивання відстані у вигляді компромісу.

Ваш хірург з катаракти може допомогти вам вирішити, чи є ви гідним кандидатом для мультифокальних ІОЛ на вашому передопераційному іспиті та консультації. Операцію з лазерної катаракти часто рекомендують, якщо ви зацікавлені в мультифокальних ІОЛ, тому що точне вирівнювання цих лінз є дуже важливим, щоб надати вам найкращий візуальний результат на всіх відстанях.

Популярні мультифокальні ІОЛ, затверджені FDA, включають: Multicocal IOL Tecnis (Medical Optics Abbott) та AcrySof IQ ReSTOR (Alcon) [20].

2.2.5 Monovision

Альтернативою розміщення та мультифокальних ІОЛ для виправлення пресбіопії є моновазія.

Немає такої речі, як "monovision IOL". Monovision - це техніка, яка повністю коректує рефракційну похибку одного ока і навмисно змушує інше око м'яко ближче. У цьому сценарії повністю скоректоване око чітко бачить віддалені об'єкти (але не бачить дуже добре, без склянок), а м'яко ближнє око дуже добре виглядає, ближче без очей (але не настільки чітко далеко).

Будь-яка комбінація преміальних ІОЛ може бути використана для операції моноовидної катаракти.

Мононізія може звучати як не дивно, коли ви вперше чуєте про це, але ця техніка дуже успішно використовується з контактними лінзами протягом багатьох років. І це зараз часто використовується при операціях з катаракти, щоб зменшити залежність людини від окулярів та комп'ютерних окулярів після операції.

Будь-яка комбінація преміальних ІОЛ може бути використана для операції моноовидної катаракти. Використовуючи пристосувальні або мультифокальні ІОЛ, термін "модифікований моноцид" часто використовується, оскільки ці лінзи пропонують розширений діапазон зору за характером їх дизайну, крім попередньо встановленого ефекту monovision [20].

2.2.6 Інший тип ІОЛ для кожного ока

Іноді найкращий візуальний результат після хірургії катаракти досягається за допомогою різного типу преміум-ІОЛ в кожному око.

Наприклад, у вас може бути більше астигматизму в одному око, ніж в іншому. Якщо це так, ваш хірург катаракти може рекомендувати торичний ІОЛ в цьому око, і, можливо, розміщення ІОЛ в іншому око, щоб також зменшити вашу потребу в комп'ютерних окулярах.

Інший сценарій для вашого хірурга катаракти рекомендувати один бренд multifocal лінзи для одного ока та іншої марки для іншого. Це пов'язано з тим, що один бренд може забезпечити краще комп'ютерне бачення, а інший може забезпечити більш чітке бачення на більш близькій відстані, для читання та інших завдань з макрозйомки. (З перших рук, враховуючи наявність різних мультифокальних ІОЛ, імплантованих в кожному око, прочитайте історію хірургії катаракти колишнього редактора DrDeramus.com Меріліна Хаддрілла).

Хірург з катаракти може повністю оцінити ваші конкретні потреби під час попереднього іспиту та консультацій та допомогти вам вибрати найкращу комбінацію преміум-класу ІОЛ для успішного візуального результату [20].

2.3 Лінза Френеля

Лінза Френеля — складна пилкоподібна лінза, складається з окремих концентричних кілець або поясів невеликої товщини, кожне з яких забезпечує таке саме заломлення світла, як і аналогічна частина звичайної лінзи. Запропонована Огюстеном Френелем в 1820 році. Перевагою конструкції є мала товщина. Перетини кілець у лінзи розраховуються таким чином, щоб забезпечити невелику сферичну аберацію, завдяки чому промені від точкового джерела, поміщеного в фокусі лінзи, після заломлення в кільцях виходять практично паралельним пучком. Недоліком конструкції є перевідбиття світла на неробочих поверхнях, що призводить до утворення паразитних бліків. Діаметр лінзи Френеля може становити від одиниць сантиметрів до кількох метрів [21].

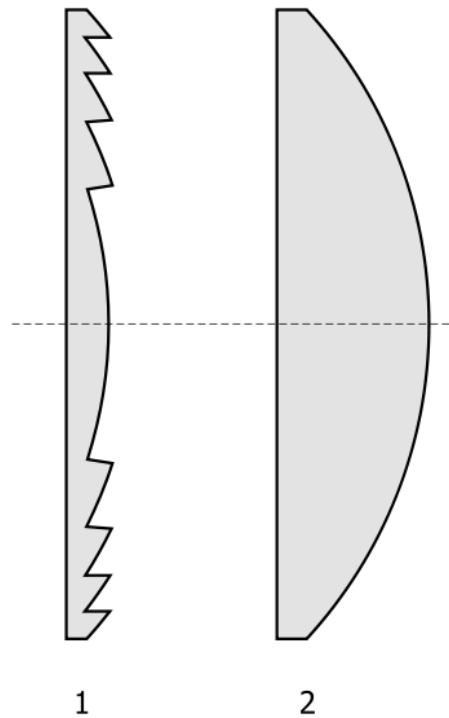


Рисунок 2.3 – поперечний переріз: 1 – лінзи Френеля; 2 – звичайної лінзи

Дифракційна лінза-луна (далі Лінза 1) має плоску структуру і вигляд, показаний на рисунку 2.4. Параметри:

- Габаритні розміри - 65×190 мм;
- Товщина – 0,4 мм;
- Матеріал – пластик (акрил);
- Фокусна відстань – 180 мм;
- Крок профілю – 0,3 мм.

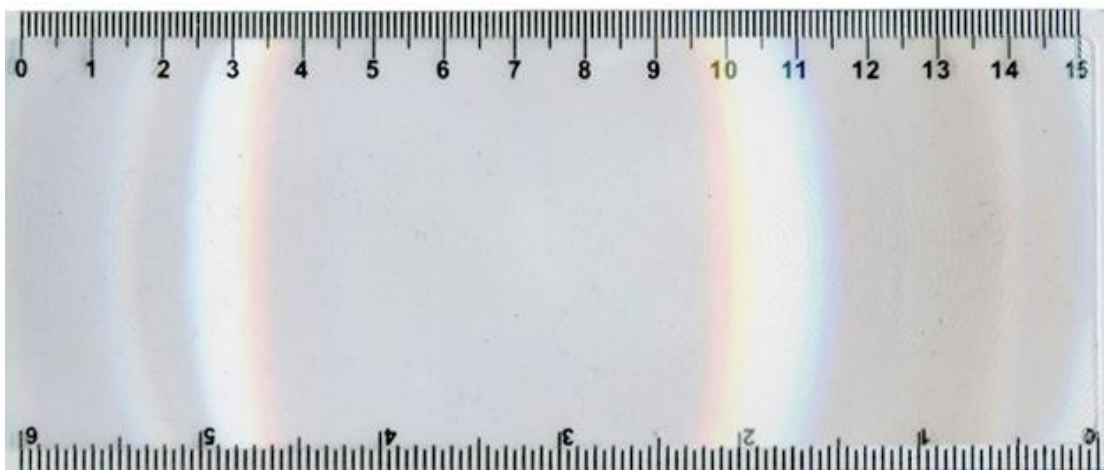


Рисунок 2.4 – Лінза Френеля у вигляді лупи

Параметри лінзи Френеля (рисунок 2.5), яку ми досліджуємо (далі Лінза 2), такі:

- Структура – плоска;
- Діаметр – 80 мм;
- Фокусна відстань – 70 мм;
- Крок профілю – 0,3 мм;
- Матеріал – пластик (акрил).

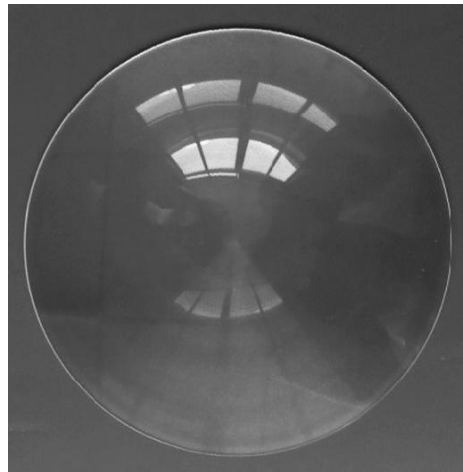


Рисунок 2.5 – Досліджувана лінза Френеля

Дифракційна лінза високої якості, яку вдалося знайти і дослідити (далі Лінза 3), показана на рисунку 2.6. Дана ДЛ виконана на плоско-паралельній пластинці зі скла та містить 12 зон із дифракційною структурою. На рисунку нижче показані 6 із них, діаметром близько 6 мм,



Рисунок 2.6 – Дифракційна лінза високої якості

із кроком 0,01 мм.

2.4 Стенд для дослідження характеристик ДЛ та ІОЛ

Досягнення сучасної офтальмологічної хірургії дозволяють швидко й без будь-яких ускладнень замінити помутнілий природний кришталік людини штучним – інтраокулярною лінзою. Якість зображення, що дає ІОЛ, не поступається якості зображення, створеного нормальним природним кришталіком, і може навіть перевершувати його.

Важливою складовою оцінки якості ІОЛ є аналіз оптичних аберацій, шляхом дослідження хвильового фронту. У результаті аналізу можна отримати інформацію про сферичну аберацію, кому, астигматизм, дефокусування і кривизну поля. Вимірювання хвильового фронту дає також можливість визначити відхилення від конструкції лінзи. Однією з важливих характеристикою ІОЛ є функція передачі модуляції. Вона може бути виміряна безпосередньо на основі аналізу функції розсіювання точки або лінії, або шляхом розрахунку цієї функції з вимірюваного хвильового фронту.

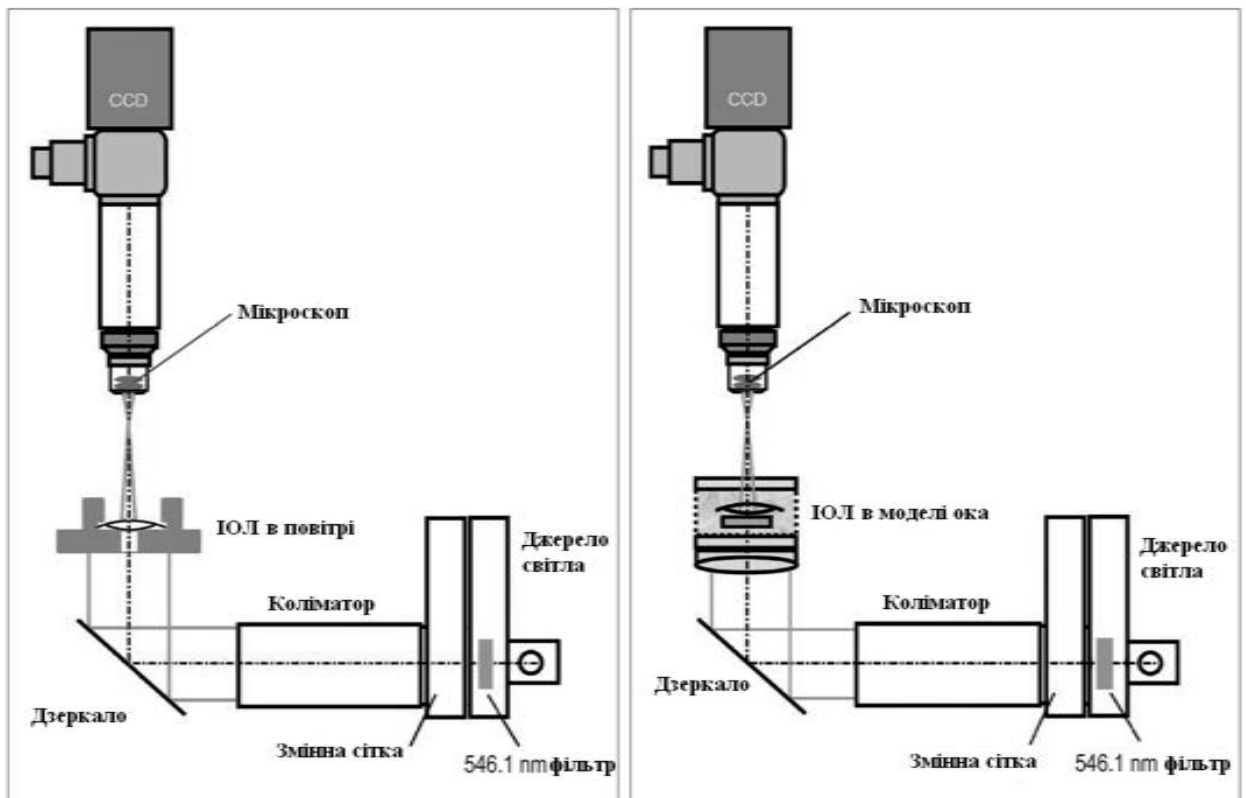
У зв'язку з постійним ускладненням конструкцій ІОЛ актуальним є подальший розвиток експериментальних вимірювань основних характеристик, притаманних ІОЛ. Для їх здійснення потрібні інноваційні потужні системи тестування. Схожий прилад був розглянутий в роботі [10], проте там використовувалась цифрова камера для отримання зображення, а створений стенд використовує цифровий мікроскоп, що значно спрощує процедуру вимірювання.

Найважливішою характеристикою є оптична сила ІОЛ, яка відображає її здатність фокусувати зображення на сітківці. Вимірявши ефективну фокусну відстань (ЕФВ) зразка, можна розрахувати і його силу. ЕФВ можна виміряти в повітрі або в місці використання моделі ока згідно з ISO 11979 [9].

Розглянемо оптичну установку, розроблену у відповідності з ISO 11979 (рисунку 2.7). Коліматор проектує зображення міри у безкінечність, потім паралельний пучок, який проходить через ІОЛ, фокусується у фокальній

площині лінзи. Отримане зображення міри проектується об'єктивом мікроскопа на ПЗЗ-матрицю цифрової камери з високою роздільною здатністю.

Існують два варіанти розміщення лінзи в даному приладі, коли лінза знаходиться в моделі ока, а також, коли просто в повітрі. У якості кріплення для лінзи використовується тримач, який розташовується на предметному столику. Обробка інформації виконується комп'ютером із відповідним програмним забезпеченням [10].



а)

б)

Рисунок 2.7 – Схема установки: а – IOЛ в повітрі; б – IOЛ в моделі ока

Відомо, що ефективна фокусна відстань IOЛ, мм, обчислюється за формулою (2.3):

$$f = f_k (h_{image}/h_{target}) \quad (2.3)$$

де h_{target} - лінійний розмір шкали; h_{image} - лінійний розмір зображення шкали, мм; f_k - фокусна відстань коліматора, мм.

Задня вершинна рефракція(сила IOЛ) (2.4):

$$D_{aq} = D_{air}Q \quad (2.4)$$

де D_{air} - задня вершинна рефракція в повітрі:

$$D_{air} = n_{med} / f_{air} \quad (2.5)$$

де $n_{med} = 1$ для вимірювань в повітрі, f_{air} - параксіальна фокусна відстань в повітрі.

Коефіцієнт перерахунку:

$$Q = D_{aq,nom} / D_{air,nom} \quad (2.6)$$

де $D_{aq,nom}$ і $D_{air,nom}$ обчислюють з використанням номінальних розмірів ІОЛ і відповідних значень для n_{med} і n_{IOL} .

Роздільна здатність ІОЛ вимірюється на оптичній лаві. Просторову частоту ν , мм^{-1} , для останнього розділеного елемента міри обчислюють за формулою (2.7):

$$\nu = (f_k / f) \cdot 2^{G + \frac{E-1}{6}} \quad (2.7)$$

де G – група елемента міри, E – номер елемента всередині групи (рисунки 2.10); f – фокусна відстань ІОЛ, мм.

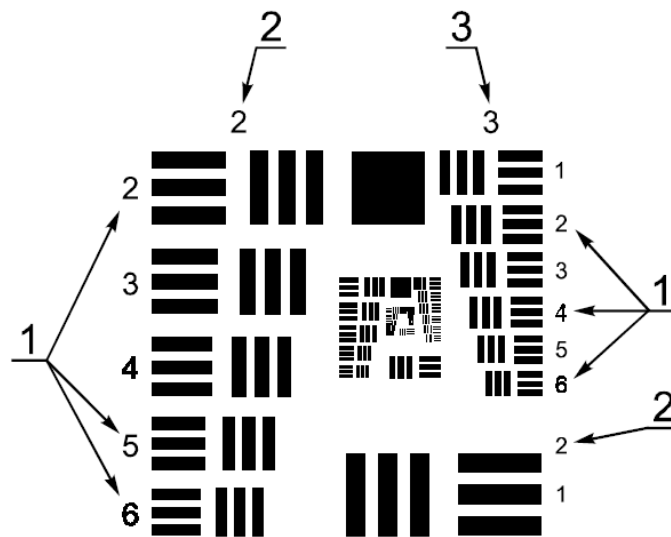


Рисунок 2.8 – Міра Військово-повітряних сил США 1951 [25], де:

1 – номер елемента; 2 – група 2; 3 – група 3

Дифракційно обмежену просторову частоту ν , мм^{-1} , обчислюють за формулою (2.8):

$$\nu = (2n \sin(u)) / \lambda, \quad (2.8)$$

де n – показник заломлення навколишнього середовища; λ – довжина хвилі світла, мм; u – вершинний кут крайнього променя.

Для малих кутів формула (2.8) може бути спрощена:

$$v = (n \cdot d) / (f \cdot \lambda) \quad (2.9)$$

де d – діаметр апертурної діафрагми, мм.

Роздільну здатність R_E від граничної просторової частоти, яка виражена у відсотках, обчислюють за формулою:

$$R_E = 100 \cdot 2^{G + \frac{E-1}{6}} \cdot (f \cdot \lambda) / (n \cdot d) \quad (2.10)$$

У формулі (2.10): $n = 1$ (повітря), $d = 3$ мм, $\lambda = 0,000546$ мм.

2.4.1 Опис стенду

Розроблений стенд відрізняється від стандарту ISO 11979. Відмінності у джерелі світла та приймачі випромінювання, а також в тому, що всі елементи схеми розташовані на прямій осі, а не заломлюються дзеркалом.

Загальний вигляд стенду показаний на рисунку 2.9. Стенд зібраний на оптичній лаві типу ОСК-2 [26]. Оптична лава призначена для оптичних вимірювань та досліджень оптичних систем. Основними її елементами є: лазер – 1, платформа з оправою для досліджуваної лінзи – 2, мікроскоп – 3.

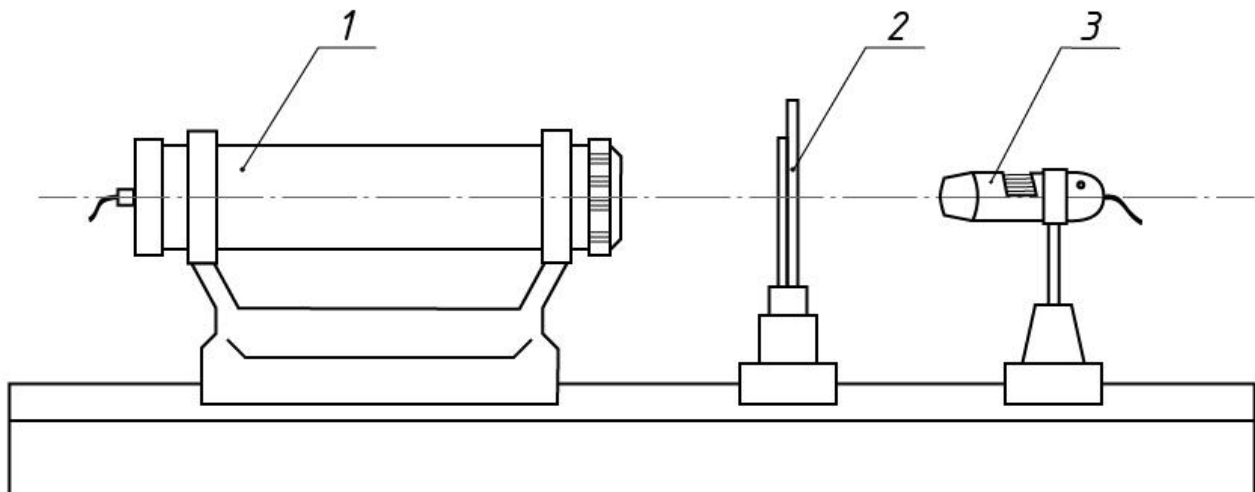


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд стенду

В якості освітлюючої системи, на відміну від ISO 11979 в експериментальному стенді використано лазер ЛГН-105. Це гелій-неоновий

лазер малої потужності. Основні характеристики: Довжина хвилі – 630 нм, потужність випромінювання – 2 мВт. Лазер, на відміну від звичайного освітлювача з коліматором, має меншу пляму розсіювання, що дозволяє зменшити вплив цього фактору на результати кінцевого аналізу оптичних характеристик досліджуваних лінз, а таж має менші габарити, завдяки чьому їм простіше користуватися в лабораторних умовах.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд коліматора лазера ЛГН-105

Лінза, що досліджується, встановлена на платформі (або в моделі ока), яка дозволяє переміщувати її вздовж оптичної осі. Перед лінзою розташована діафрагма, призначення якої – зменшення впливу аберацій широких пучків (сферичної аберації і коми).

В якості приймача зображення міри використовується USB-мікроскоп китайського виробництва (рисунок 2.11). Збільшення мікроскопа регулюється в межах від $20\times$ до $200\times$, формат матриці 640×480 , частота кадрів 50-60 Гц [27].



Рисунок 2.11 – USB-мікроскоп

2.4.2 Методи вимірювання задньої вершинної рефракції

Вимірювання задньої вершинної рефракції (ЗВР) може бути проведене трьома альтернативними методами, описаними нижче в п. 1-3.

1. Маємо радіус кривизни і товщину ІОЛ із технічного опису лінз, тому задню вершинну рефракцію D , дптр, можна розрахувати за формулою (2.11) [9]:

$$D = D_f + D_b - (t_c/n_{IOL})D_f D_b, \quad (2.11)$$

де D_f – задня вершинна рефракція передньої поверхні ІОЛ, дптр;

D_b – задня вершинна рефракція задньої поверхні ІОЛ, дптр;

t_c – товщина ІОЛ, м;

n_{IOL} – показник заломлення матеріалу ІОЛ.

Обчислити D_f за формулою (2.12):

$$D_f = (n_{IOL} - n_{med})/r_f, \quad (2.12)$$

де n_{med} – показник заломлення навколишнього середовища;

r_f – радіус передньої поверхні ІОЛ, м.

Обчислити D_b за формулою (2.13) [9]:

$$D_b = (n_{med} - n_{IOL})/r_b, \quad (2.13)$$

де r_b – радіус задньої поверхні ІОЛ, м.

При розрахунках за формулами (2.11-2.13) треба враховувати точну орієнтацію передньої і задньої поверхонь ІОЛ уздовж оптичної осі. Задню вершинну рефракцію розраховують за формулою (2.11) при $n_{med}=1,3361$ значеннях радіусів кривизни, товщини і показника заломлення ІОЛ при $\lambda = 546,07$ нм.

2. Для визначення ЗФВ за вимірним значенням задньої фокусної відстані (ЗФВ), необхідно закріпити ІОЛ на оптичній лаві за діафрагмою. Відстань від задньої вершини ІОЛ до фокальної точки буде ЗФВ ІОЛ [9].

Вимірювання слід проводити в нормальних кліматичних умовах при температурі навколишнього середовища (35 ± 2) °С, із використанням джерела випромінювання з довжиною хвилі (546 ± 10) нм. Обчислення за формулами (2.14 – 2.17) проводять при умові, що розміри ІОЛ не відрізняються від розмірів ІОЛ в умовах *insitu*. При невиконанні даних умов ЗФВ ІОЛ вимірюють в умовах *insitu* із відповідними поправками в розрахунках.

Обчислити відстань від задньої вершини ІОЛ до задньої головної площини ІОЛ за формулою (2.14) [9]:

$$-A_2H'' = (D_f / D)(n_{med} / n_{IOL})t_c, \quad (2.14)$$

де $n_{med} = 1$ для вимірювань у повітрі.

A_2H'' є векторною величиною, яка може бути додатною чи від'ємною.

Величину A_2H'' додають до ЗФВ для корегування [9].

Обчислити відстань від параксіальної фокальної точки до найденної фокальної точки (найкращого фокуса) D_{ef} , мм, за формулою (2.15) [9]:

$$-D_{ef} = -LSA/2, \quad (2.15)$$

де LSA – повздовжня сферична аберація, мм.

Примітки.

1) D_{ef} є векторною величиною, яка може бути додатною чи від'ємною. Значення D_{ef} додають до ЗФВ для коректування.

2) Формула (2.15) є спрощеною. Більш точний розрахунок може бути отриманий за допомогою програм для розрахунку оптичних систем. У подібних

програмах положення найкращої фокальної точки залежить від просторової частоти падаючого випромінювання [9].

Скласти дві поправки і ЗФВ для отримання параксіальної фокусної відстані у повітрі f_{air} , м, і обчислити задню вершинну рефракцію у повітрі D_{air} за формулою (2.16) [9]:

$$D_{air} = n_{med} / f_{air}, \quad (2.16)$$

де $n_{med} = 1$ для вимірювань у повітрі.

Обчислити коефіцієнт перерахунку Q за формулою (2.17):

$$Q = D_{aq,nom} / D_{air,nom}, \quad (2.17)$$

де $D_{aq,nom}$ і $D_{air,nom}$ обчислюють за формулою (2.11) з використанням номінальних розмірів ІОЛ і відповідних значень для n_{med} і n_{IOL} .

Значення n_{IOL} залежить від температури і вологості матеріалу ІОЛ.

Обчислити задню вершинну рефракцію в умовах *insitu* D_{aq} за формулою (2.18) [9]:

$$D_{aq} = D_{air} Q \quad (2.18)$$

3.Приведений метод задньої вершинної рефракції за вимірюваним збільшенням [9].

Використовується стенд, схема якого приведена на рисунку 2.11.

Штрихова міра має визначені лінійні розміри, наприклад, відстань між двома лініями. Мікроскоп повинен бути оснащеним вимірювальним пристроєм, наприклад сіткою, для вимірювання даного лінійного розміру на зображенні.

Порядок вимірювання. Визначити лінійний розмір шкали h_{target} , мм. Визначити фокусну відстань коліматора f_k , мм. Ці дві операції слід повторювати при кожному наступному вимірюванні. Відношення f_k / h_{target} може бути отримане установкою каліброваних лінз замість ІОЛ.

Закріпити ІОЛ на оптичній лаві за діафрагмою.

Навести мікроскоп на зображення і виміряти його лінійний розмір h_{image} , мм. Фокусування слід проводити на просторовій частоті, близькій до 0,3 граничної частоти ІОЛ [9].

Обчислити фокусну відстань ІОЛ f , мм, за формулою (2.19):

$$f = (f_k / h_{target}) \cdot h_{image} \quad (2.19)$$

Додати поправку на розфокусування до f для отримання параксіальної фокусної відстані f_{air} і провести обчислення за формулами (2.14 – 2.16).

2.4.3 Вимірювання роздільної здатності

Лінійна межа роздільної здатності за критерієм Релея або дифракційна роздільна здатність зображення світлих і темних штрихів, що чергуються, однакової ширини при розташуванні їх в центральній зоні системи, мм:

$$e'_0 = 0,515\lambda / A' = 1,03 f' / D' \quad (2.20)$$

Якщо $\lambda = 0,555 \cdot 10^{-3}$ мм, то

$$e'_0 = f' / 1750 D' \quad (2.21)$$

Візуальна роздільна здатність за Фуко в лініях на міліметр, мм^{-1} :

$$R_e = 1 / e'_0 = (1750 D') / f' \quad (2.22)$$

Роздільна здатність в центрі поля обчислюється за формулою (2.23):

$$R = N / \beta' \quad (2.23)$$

де N – кількість штрихів міри на міліметр; $\beta' = f'_{об} / f_k$ – лінійне збільшення.

2.4.4 Дослідження модуляційної передавальної функції

Як відомо, оптична передавальна функція (ОПФ) (*optical transfer function, OTF*) $D(v_x, v_y)$ характеризує передачу структури предмета оптичною системою як функція просторових частот:

$$u' = u D(v_x, v_y) \quad (2.24)$$

ОПФ пов'язана з функцією розсіювання точки (ФРТ) інтегральним перетворенням Фур'є:

$$D(v_x, v_y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-i2\pi(v_x v + v_y w)] h(v, w) dv dw}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(v, w) dv dw} \quad (2.25)$$

або ОПФ=F[ФРТ], де F–позначення Фур’є перетворення:

$$F[f(x, y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-i2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy \quad (2.26)$$

ФРТ показує, як оптична система зображує точку, а ОПФ показує, як оптична система зображує гармонійну решітку, тобто як змінюється комплексна амплітуда решітки в залежності від частоти.

Оптична передавальна функція - це комплексна функція:

$$D(v_x, v_y) = T(v_x, v_y) \exp[i\varphi(v_x, v_y)] \quad (2.27)$$

Модуль ОПФ називається модуляційною передавальною функцією (МПФ) або частотно-контрастною характеристикою (ЧКХ) $T(v_x, v_y) = |D(v_x, v_y)|$.

Методика визначення МПФ полягає в тому, що за допомогою розробленого стенду отримується зображення міри через дифракційну лінзу. Комп’ютерною програмою MATLAB легко можна знайти ОПФ, а за допомогою програми MathCad вирахувати МПФ.

2.5 Загальний вигляд експериментального стенду

Стенд для дослідження ДЛ та ІОЛ має багато переваг, порівнюючи з аналогами. З огляду на те, що стенд використовується насамперед для експериментальних досліджень, не враховуються його габарити. Схема настільки проста, що за необхідності її легко перетворити в компактний прилад для вимірювання в «польових» умовах. Також його можна застосовувати для проведення експериментів в офтальмологічних лабораторіях та дослідженні інших прозорих об'єктів. Фото діючої установки наведено на рисунку 2.12.

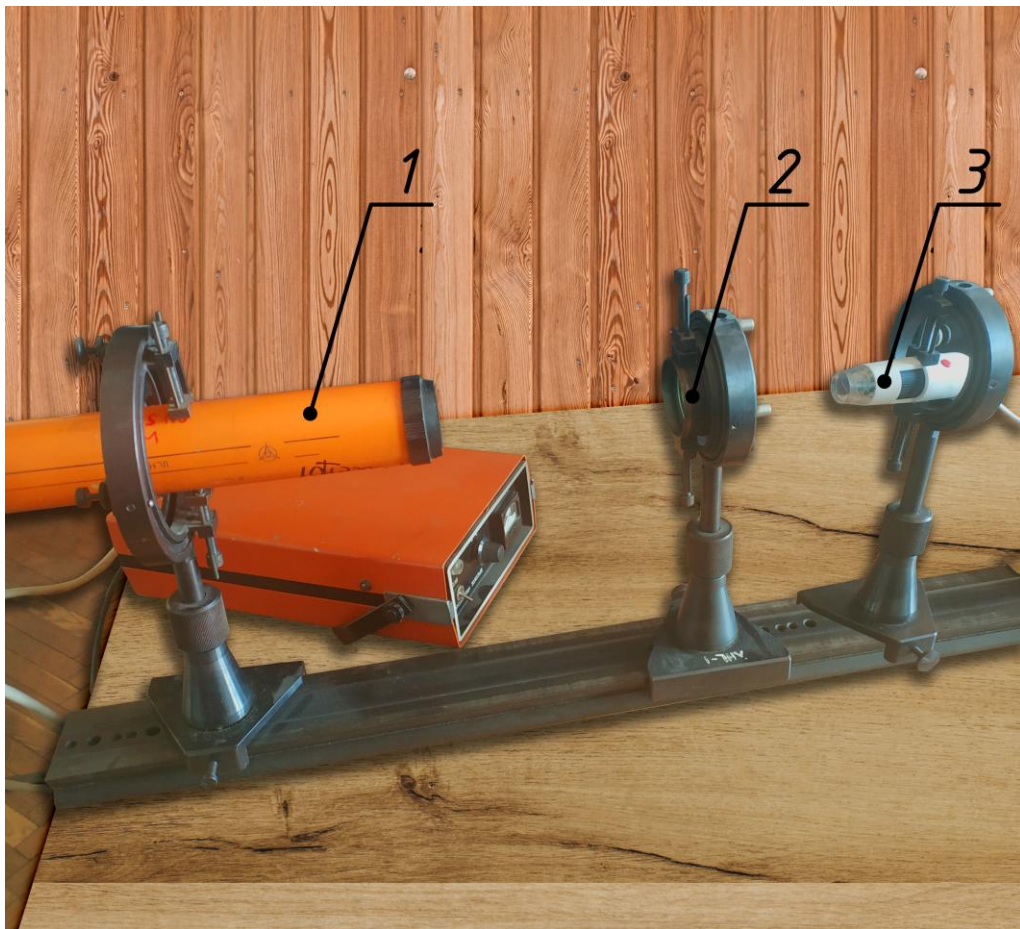


Рисунок 2.12 – Стенд для вимірювання характеристик дифракційних лінз:

1 – лазер; 2 – дифракційна лінза в оправі; 3 – USB-мікроскоп

Таким чином, розроблений варіант стенду має ряд переваг відносно аналогічних, створених раніше. Насамперед це проста схема, за допомогою якої можна вимірюються характеристики не лише інтраокулярних лінз, а й

звичайних дифракційних лінз. За необхідністю стенд можна трансформувати в компактний прилад, який би не поступався відомим аналогам.

Значним спрощенням у схемі, яка наведена в ISO 11979, є використання USB-мікроскопа. Його малі габарити, вага і безпосереднє з'єднання з ПК допомагає отримати достатньо точні результати вимірювань.

2.6 Висновок до розділу 2

У другому розділі було розглянуто принципи вимірювання оптичних характеристик дифракційних лінз, Особлива увага була звернена на інтраокулярні лінзи та лінзи Френеля. Наведено основні параметри досліджуваних лінз.

Запропоновано методику дослідження дифракційних лінз. Описано загальний інструмент для проведення досліджень – розроблений стенд для вимірювання характеристик дифракційних та інтраокулярних лінз та частини, з яких він складається. У результаті було успішно здійснено тестування оптичної системи приладу та здійснено роботу по створенню методичних матеріалів для роботи зі стендом. Таким чином, було розроблено новий метод для дослідження характеристик ДЛ та ІОЛ.

РОЗДІЛ 3 ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРОБЛЕНОГО СТЕНДУ

Дифракційні лінзи дозволяють чітко побачити об'єкти, розташовані на фіксованих відстанях. Є певний недолік – наявність фонового зображення, що призводить до пониження контрасту головного зображення. Тому при проектуванні завжди є актуальним проводити оцінку якості головного зображення, що кількісно виконується через обчислення модуляційної передаточної функції (МПФ).

Оцінка контрасту зображення зводиться до розрахунку МПФ, котра в полярній системі координат є модулем перетворення Фур'є-Бесселя від функції розподілу інтенсивності в зображенні нескінченно віддаленого об'єкта $I(r_0)$ [20]:

$$МПФ(v) = 2\pi \left| \int_0^{\infty} I(r_0) J_0(2\pi r_0 v) r_0 dr_0 \right| \quad (3.1)$$

де v – просторова частота;

r_0 – радіальна координата в площині зображення;

$J_0(x)$ - функція Бесселя першого роду нульового порядку.

Розрахунок МПФ дозволяє знайти мінімально можливі значення просторового розділення оптичної системи.

Розподіл освітленості у зображенні точкового джерела називають картиною Ері. Вона являє собою круглу пляму, названу кружком Ері, навколо якої розміщені світлі концентричні кільця.

Радіус кружка Ері дорівнює (3.2):

$$r_{eri} = 1,22 \cdot \lambda \frac{f_0'}{D_p} \quad (3.2)$$

де λ – довжина хвилі, найчастіше $\lambda=0,55$ мкм.

f_0' – задня фокусна відстань лінзи;

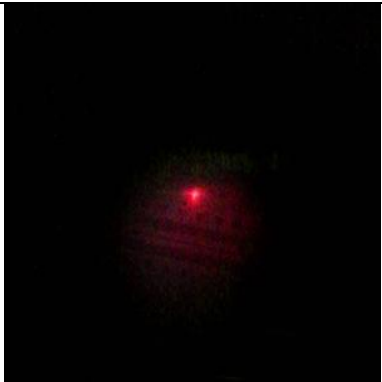
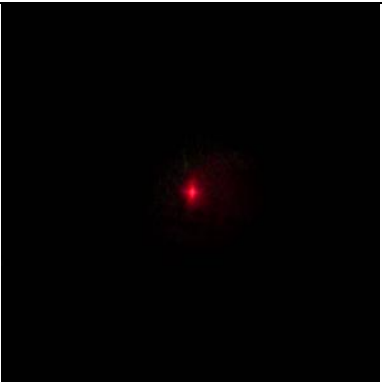
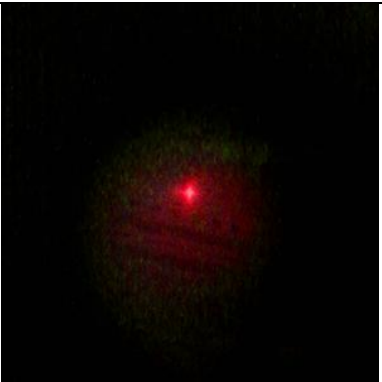
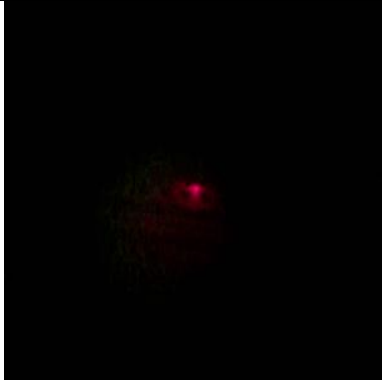

D_p – діаметр вхідної зіниці.

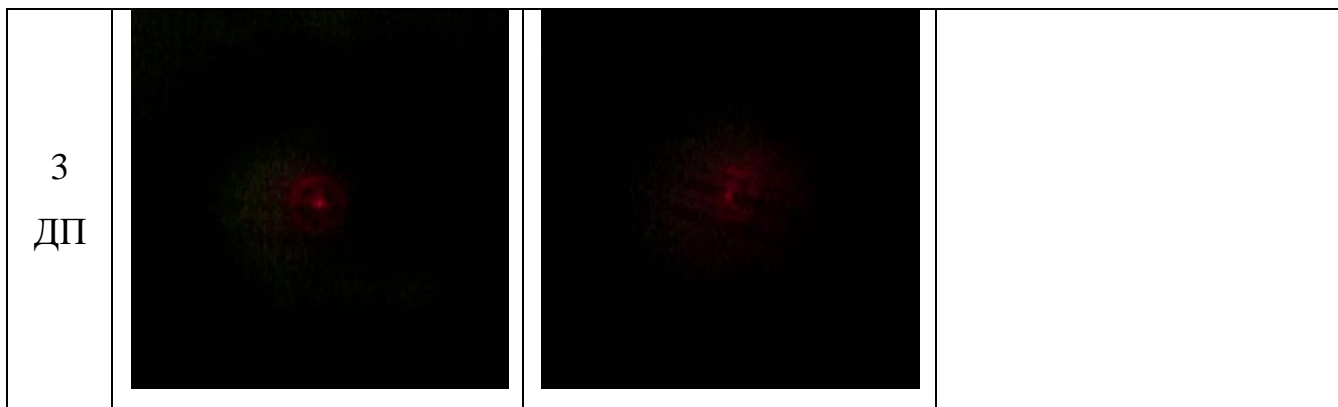
Кружок Ері визначає мінімально можливу відстань між зображеннями двох точок, які спостерігаються окремо. Для оцінки якості зображення, що створює оптична система стенду, необхідно визначити математичний вигляд МПФ. Сучасні комп'ютерні програми дозволяють розрахувати МПФ реальної системи. Тому, для початку розглянемо зображення, отримані при проведенні експериментів на стенді.

3.1 Зображення, отримані при дослідженні

Зображення отримані зі збільшенням $20\times$ наведені в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Зображення з Лінзи

№ вим.	1	2	3
1 ДП			
2 ДП			



3.2 Побудова функції розсіювання точки

Побудуємо об'ємні графіки функцій розсіювання точки, вибравши по одному з різних груп зображень.

На рисунках 3.1 – 3.3 показані тривимірні графіки ФРТ, отримані із зображень Лінзи . Візьмемо по одному зображенню отриманих з кожного порядку.

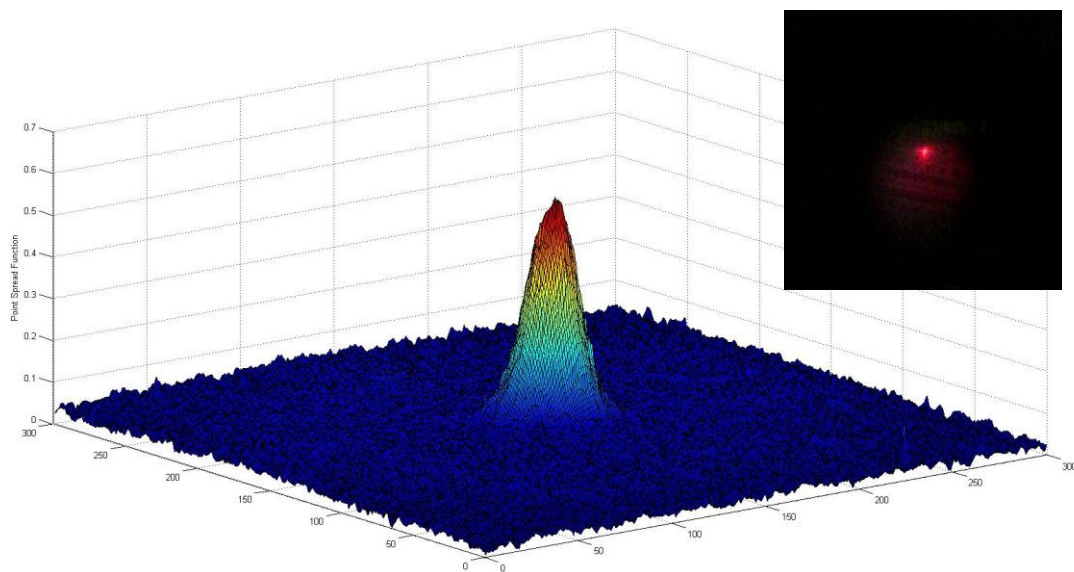


Рисунок 3.1 – Тривимірний графік ФРТ, 1 порядок

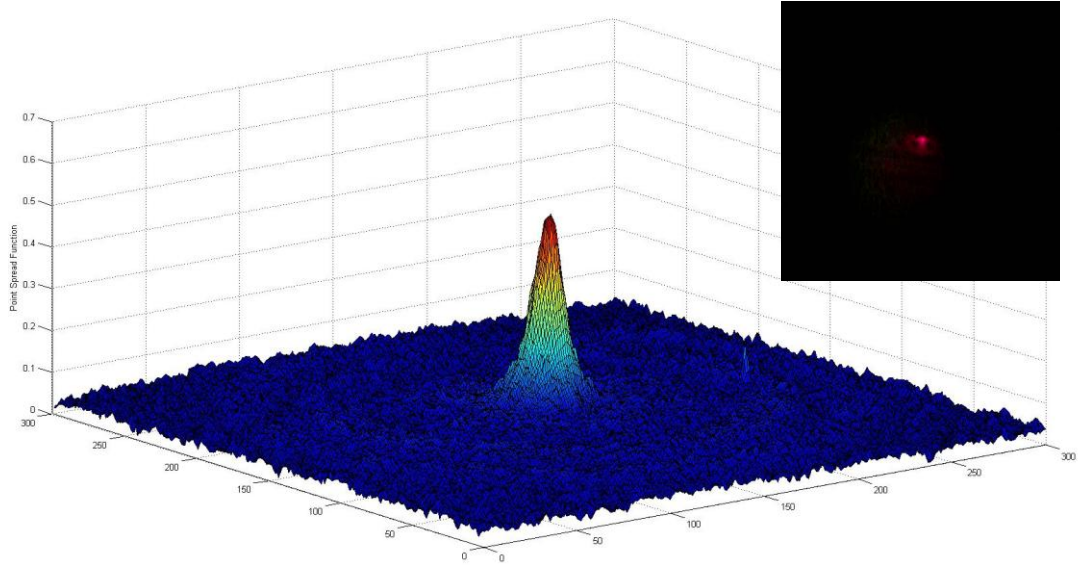


Рисунок 3.2 – Тривимірний графік ФРТ, 2 порядок

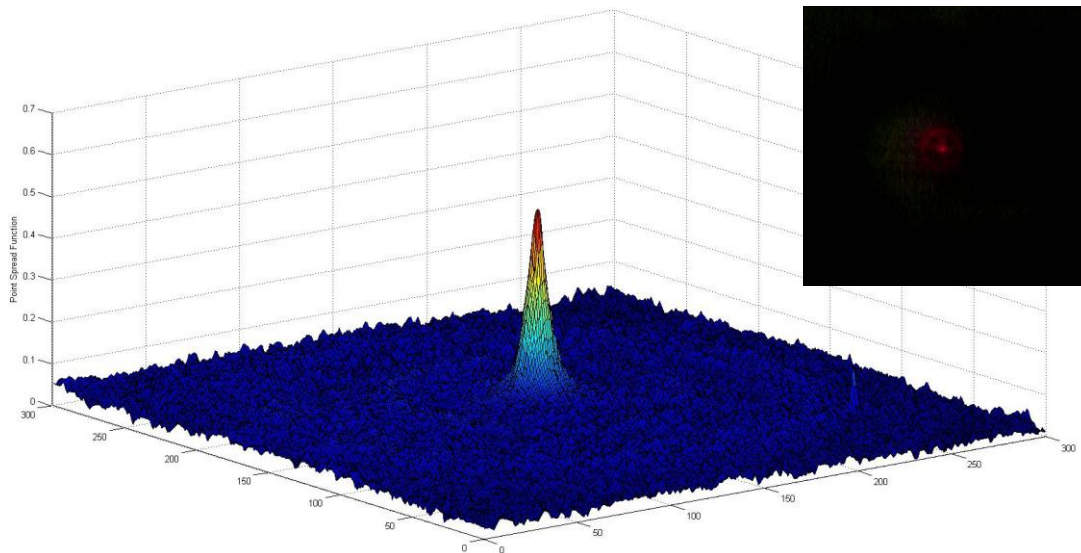


Рисунок 3.3 – Тривимірний графік ФРТ, 3 порядок

3.3 Розрахунок модуляційної передавальної функції

Розрахунок починається із обробки зображень, наведених в таблиці 3.1. За допомогою комп'ютерних засобів перетворюємо кольорові зображення у 256 відтінків сірого та будуємо тривимірні графіки ФРТ, наведені на рисунках 3.1 –

3.3 в п. 3.3. Таким же чином будемо переріз графіків ФРТ, які наведені нижче на рисунках 3.4 – 3.6.

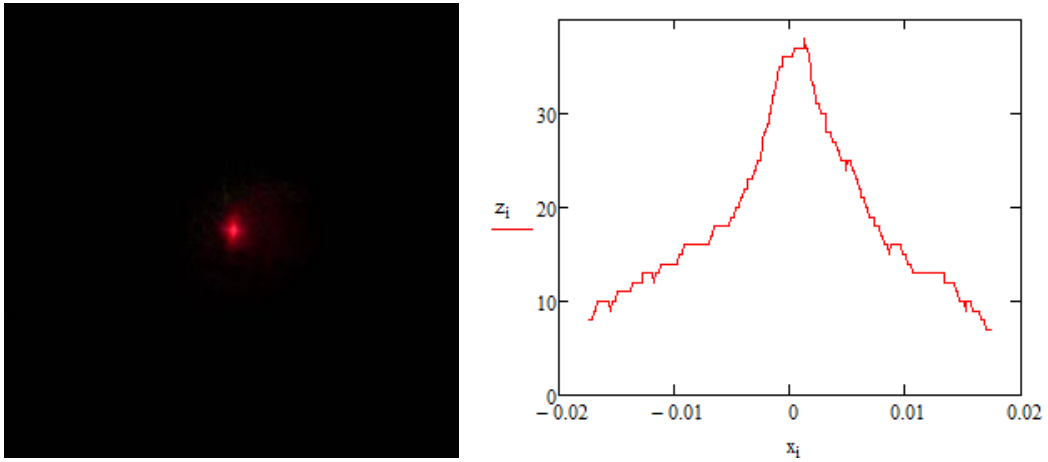


Рисунок 3.4 – Зображення та відповідний йому графік ФРТ

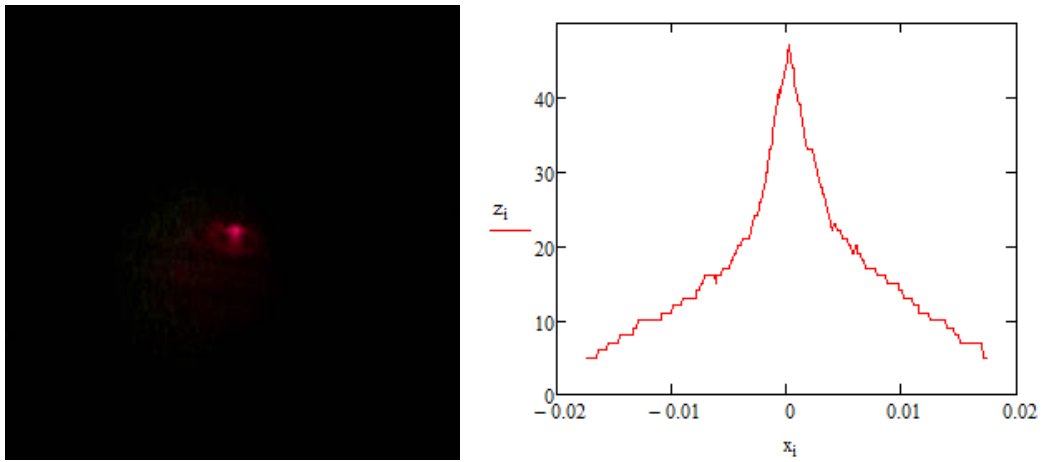


Рисунок 3.5 – Зображення та відповідний йому графік ФРТ

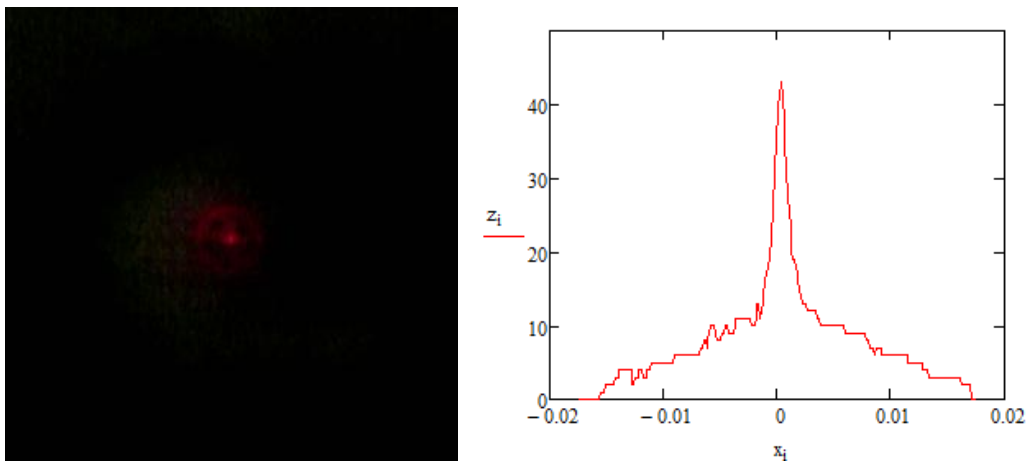


Рисунок 3.6 – Зображення та відповідний йому графік ФРТ

Для розрахунку МПФ скористаємось відношенням прямого перетворення Фур'є-Бесселя формулою 3.2 та програмою Matcad:

$$M(v_r) = \left| \frac{\sum_{i=150}^{300} [2\pi(z_i)x_i J_0(2 \cdot \pi \cdot v_r \cdot x_i)]}{\sum_{i=150}^{300} [2\pi(z_i)x_i J_0(2 \cdot \pi \cdot 0 \cdot x_i)]} \right| \quad (3.2)$$

де J_0 – функція Бесселя першого роду нульового порядку.

На рисунках 3.7 – 3.9 наведено отримані графіки МПФ.

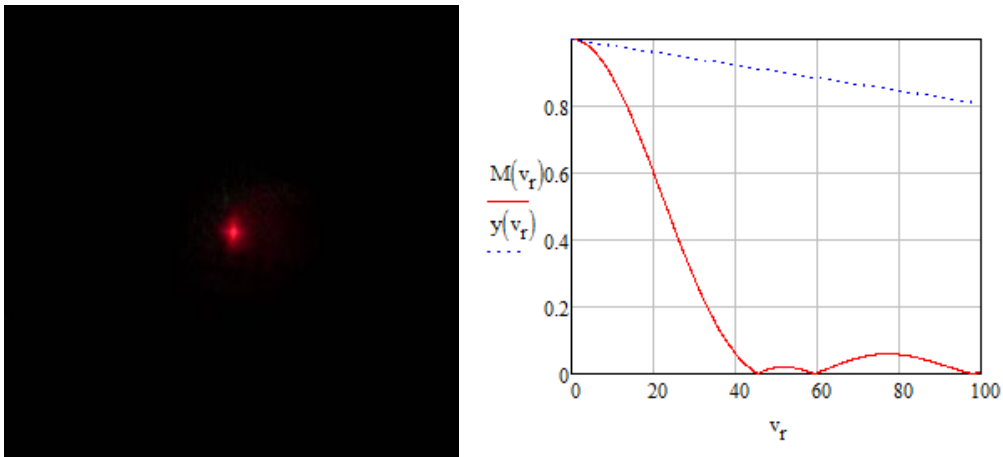


Рисунок 3.7 – Зображення та відповідний йому графік МПФ

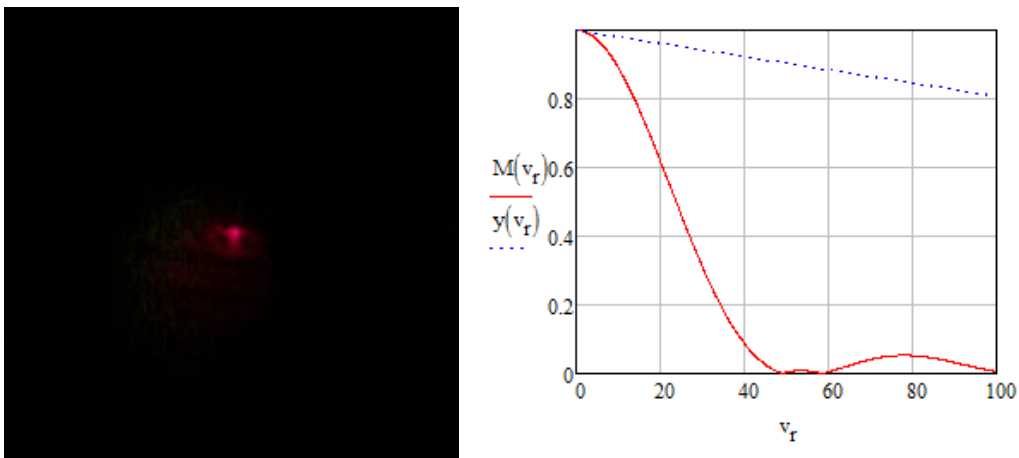


Рисунок 3.8 – Зображення та відповідний йому графік МПФ

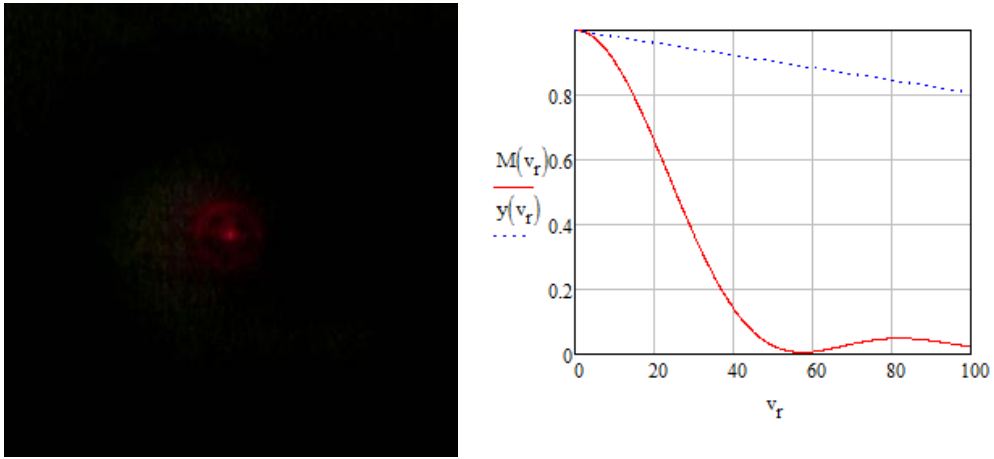


Рисунок 3.9 – Зображення та відповідний йому графік МПФ

Таблиця 3.2 – Порівняння отриманих зображень та відповідних їм графіків ФРТ та МПФ

	1 ДП	2 ДП	3 ДП
Зображення			
ФРТ			
МПФ			

3.4 Висновок до розділу 3

У даному розділі були наведені зображення, отримані за допомогою створеного стенду для дослідження характеристик дифракційних лінз, розроблено алгоритм розрахунку модуляційної передавальної функції, отримано графіки функції розсіювання точки: тривимірні та двовимірні, а також модуляційної передавальної функції.

Отримані в ході випробувань результати цілком задовольняють потреби потенційних користувачів даного приладу і можуть з легкістю конкурувати з готовими пропозиціями на ринку.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ»

4.1 Опис ідеї проекту

Стенд належить до оптичного приладобудування, зокрема до оптичних методів контролю деталей, які широко використовуються при різному виробництві, а також у медичних цілях для заміни кришталіків ока на штучні. Даний стенд буде цікавий для виробництв які використовують дифракційні елементи у виробництві, а також в офтальмології для контролю якості штучних кришталіків.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Стенд для дослідження дифракційних лінз	Виготовлення дифракційних елементів	Підвищення точності контролю дифракційних елементів
	Визначення якості імплантів для ока	2. Вигідна ціна продукту
	3. У навчальних цілях, для студентів оптичних та оптико-електронних приладів	

Останніми роками ДОЕ все частіше використовуються як в спеціальних приладах, так і в приладах, що тісно пов'язані з буденним життям людей. Прикладами можуть слугувати пристрої віртуальної реальності, фото індустрія, офтальмологія, медицина та косметологія, навчання, наука, ІЧ техніка, альтернативні джерела сонячної енергії тощо. Головними вигодами, які пропонують ДОЕ є: мініатюризація оптичних компонентів, покращення якості

зображення за рахунок корекції аберацій різного типу, зменшення часу та ресурсів для синтезу нових ОС з ДОЕ.

Таблиця 4.2. Інформаційна карта проекту

1. Назва проекту	Стенд для вимірювання оптичних характеристик дифракційних лінз
2. Автори проекту	Вовчок Іван Олександрович, Васильковська Інна Олегівна
3. Коротка анотація	Даний прилад може використовуватись у всіх галузях науки і техніки де використовується дифракційна оптика. Даний прилад більш заточений під використання в галузі офтальмології, де він використовується для перевірки якості виготовлення імплантів штучного кришталика ока (інтраокулярних лінз).
4. Термін реалізації проекту	12 місяців
5. Необхідні ресурси	Трудові ресурси: ІТ спеціаліст, маркетолог, менеджер. Матеріальні ресурси: Приміщення , комп'ютери, столи, стільці, 2 осцилографи, 2 паяльні станції, 2 мультиметри, 2 вольтметри, 2 генератора частоти, 2 амперметри, лава оптична. Фінансові ресурси: 500 тис. грн.
6. Опис проблеми, яку вирішує проект	Основною проблемою продукту є великі габарити, складне програмне забезпечення та висока ціна.
8. Головні цілі та завдання проекту	Створити доступний продукт, який зможе конкурувати з великими гравцями на ринку.
9. Очікувані результати	В результаті очікується створити якісний продукт який буде задовольняти усі потреби споживачів, при цьому зберегти доступні ціни та зручність використання.

Пропонується новий стенд, що має переваги в точності, а також простоті використання, відносно вже існуючих.

Сильними сторонами ідеї проекту є безкоштовність програмного забезпечення, в той час як у конкурентів вартість програмного забезпечення дуже висока, а також невелика кількість розробників, оскільки для аналізу ДОО не потрібна велика кількість кваліфікованого персоналу; нейтральною стороною є автоматизація розрахунків.

Таблиця 4.3. - Визначення сильних та слабких характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3		
1.	Економічні	50\$	1000\$	1500\$	3000\$		+
2.	Призначення (технічні)	Простий прилад та проста програма	Складний прилад, велика та складна програма з багатьма непотрібними функціями	Складний прилад, відносно складна та велика програма	Складний прилад, складна та велика програма		+
3.	Надійність	Ремонтпродатний	Долговічний	Гарантійний термін - 5 років	Гарантійний термін - 10 років		+
4.	Ергономічні	Великі габарити, гучна програма	Складність у набутті навичок	Складність у набутті навичок	Складність у набутті навичок	+	
5.	Транспортовальні	Через мережу Інтернет	Через мережу Інтернет	Через мережу Інтернет	Через мережу Інтернет		+

Сильна сторона ідеї проекту полягає у її дешевизні та простоті використанні в порівнянні з іншими конкурентами, слабкою стороною в свою чергу є великі габарити та низька зручність транспортування. Метод є зручним в управлінні та простоті в набутті навичок. Тому найважливішими перевагами ідеї перед конкурентами є –, простота в управлінні, дешевизна та простота в набутті навичок.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Ідея проекту: технологія полягає у аналізі зображення точки яка проектується лазером через досліджуваний зразок. На основі знімку точки формується графік розподілу інтенсивності світла, розраховується модуляційно передавальна функція та дифракційна ефективність лінзи. Виходячи з цих даних програма визначає якість поверхні інтраокулярної лінзи порівнюючи данні реальної лінзи з еталонним зразком.

Таблиця 4.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Методи дослідження оптичних характеристик	Підвищення точності	Наявні	Доступні
2.	Схема пристрою	Запатентований пристрій для контролю зносу залізничного транспорту	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Підвищення точності та простоти контролю оптичних характеристик.				

За результатами аналізу технологічного здійснення ідеї проекту, можемо зробити висновок, що реалізація проекту можлива.

Обрана технологія реалізації – підвищення точності та простоти контролю оптичних характеристик дифракційних лінз.

Обраною технологією реалізації проекту є автоматизований розрахунок на базі глобальної оптимізації, оскільки ця технологія є найбільш зручною та простою у використанні, результативною, універсальною та не вимагає залучення висококваліфікованого користувача. За результатами аналізу технологічної здійсненності ідеї проекту можна зробити висновок, що реалізація проекту можлива.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У даному підрозділі визначаються ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, що можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів.

Таблиця 4.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	200 000\$
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає (5% до 2021р.)
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ISO 11979
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	10%

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту за попередньою характеристикою потенційного ринку стартап-проекту показав, що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту показала, що цільовою аудиторією є фірми що використовують дифракційну оптику в приладах та офтальмологічні компанії що займаються протезуванням. Дана методика задовольняє вимогам потенційним споживачам товару. Дані наведені у таблиці 4.6:

Таблиця 4.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Виявлення дефектів дифракційного профілю у звичайних дифракційних елементах, і також у інтраокулярних лінзах	Фірми що використовують дифракційну оптику в приладах, офтальмологічні компанії що займаються протезуванням	Для точного вимірювання характеристик дифракційних лінз необхідні лабораторії та спеціаліст з відповідними знаннями щодо проведення вимірювання	Зручна конструкція, легкість користування програмним забезпеченням, велика точність вимірювання

Для точного розуміння усіх загроз які можуть стати на заваді реалізації проекту проведемо аналіз цих факторів, результати аналізу представлені в таблиці 4.7:

Таблиця 4.7. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Зменшення ціни на товар компаній-конкурентів	Конкуренти можуть знизити ціну на власну продукцію з метою залучення користувачі	Безкоштовна підтримка технічного обслуговування
2.	Простота у використанні методу	Конкуренти можуть запровадити (винайти) новий/ або вдосконалити вже відомий метод	Вдосконалення свого методу
3.	Зниження доходів потенційних клієнтів	Зниження доходів може призвести до відмови від подібних продуктів або неможливості імпорту комплектуючих	Довгий термін гарантійного обслуговування, та використання бюджетних альтернатив для ремонту
4.	Ноу-хау конкурентів	Конкуренти можуть створити зовсім інший підхід або метод	Вдосконалення або створення зовсім іншого продукту
5.	Створення нових послуг конкурентами	Конкуренти можуть запровадити нові додаткові послуги до продуктів	Створення додаткових послуг, запровадження програми лояльності або знижок

Аналіз ринкового середовища показав фактори загроз, що можуть перешкодити впровадженню проекту, такими факторами є – конкуренти , що можуть зменшити ціну на власні прилади (або методи) та можливість винаходженню нового або вдосконалення старого методу (або приладу).

Після проведення аналізу факторі загроз, потрібно розуміти якими ресурсами ми володіємо для залучення і задовільнення потреб наших потенційних клієнтів, результати аналізу приведені в таблиці 4.8:

Таблиця 4.8. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Потреба клієнтів в результативнішому методі	Клієнти хочуть отримати більш результативніші методи	Вдосконалення запропонованого методу
2	Винайдення простого та результативного методу	При оптимізації та аналізу методів можливе винайдення нового методу оптико-електронного позиціювання	Оптимізація запропонованого методу та аналіз існуючих
3	Можливість здешевлення методу	Нові технології можуть сприяти зменшенню ціни	Впровадження нових технологій
4	Вихід на міжнародний ринок	Можливість виходу на міжнародний ринок	Впровадження нових технологій, вдосконалення запропонованого методу

Аналіз факторів можливостей показав, що поведінка споживачів може призвести до вдосконалення методу, виходу на міжнародний ринок, можливості використання новітніх технологій. Тому, є необхідність в подальшому шукати методи вдосконалення методу, аналіз існуючих та впровадження нових технологій

Перед входженням на ринок потрібно розуміти наскільки сильні наші конкуренти і наскільки ми можемо боротися з ними за потенційних клієнтів. Результати наведені в таблиці 4.9:

Таблиця 4.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
--------------------------------------	---	--

1. Монополістична конкуренція	Галузь в основному є конкурентоспроможною, проте існує декілька явних лідерів	Щоб вийти на ринок необхідно мати конкурентний метод обробки результатів
2. Глобальний рівень конкурентної боротьби	Закордонні та Українські конкуренти	Вихід на Український ринок не передбачає ніяких проблем, оскільки в Україні не має подібних систем, проте вихід на міжнародну арену може бути складним
4. Товарно-видова конкуренція	Конкуренція між товарами одного виду	Оптимізація запропонованого методу та пошук нових
5. Ціновий характер	Продукція дуже дорога	Зменшити вартість розробки, впровадити нові технології

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що наявна конкуренція в Україні ускладнює вихід на ринок, тому необхідно створити якісний метод. Але, мій метод є недорогим, тому може конкурувати з існуючими компаніями. Для впровадження методу за кордон, необхідно впроваджувати нові технології.

Аналогічний аналіз проведемо за методом Майкла Портера. Результати аналізу представленні в таблиці 4.10:

Таблиця 4.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	ImageMaster, OptiSpheric, IOLA,	Затрати, ресурсів, досвід	Кількість замовленої продукції	Кількість замовлень. Попит.	Ціна, лояльність споживачів

	Lambda-X				
Висновки:	Більше спеціалізуються на іншому обладнанні	Є можливість входу в ринок за рахунок гучності цін та переваги у витрат Є потенційні конкуренти серед існуючих компаній	Постачальники не диктують умови роботи на ринку. Затримки під час встановлення та юстування спеціальних стендів.	Клієнти диктують наступні умови роботи на ринку: Якість. Висока вимірювальна точність МПФ та ДЕ	Обмеження для роботи на ринку через товари-замінники. Обмежують встановлення високих цін на метод

Конкуренти в галузі більше спеціалізуються на виробництві інших приладів з використанням дещо інших методів, тож основною проблемою виходу на ринок є великі фінансові затрати.

Для кращого розуміння наших перспектив потрібно провести аналіз конкурентоспроможності нашого підприємства. Результати аналізу наведені в таблиці 4.11:

Таблиця 4.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Потреба споживачів	Підприємствам у різних галузях (військова галузь, медицина, аграрного, промислового та космічно-авіаційного сектору)
2	Простота в експлуатації	Метод простий у використанні.
3	Маркетинговий потенціал	Підвищення точності – надійність вкладень.
4	Вартість	Конкурентна ціна

5.	Технічне обслуговування	Міжнародна технічна підтримка, гарантія якості обслуговування.
----	-------------------------	--

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності показало, що існує факт необхідності підвищення точності в виробництві, а також в обслуговуванні продукту.

Порівнюємо слабкі та сильні сторони нашого проекту щодо нашого прямого конкуренту LAMBDA-X, для більшого розуміння наших сил. Порівняльні результати приведені в таблиці 4.12:

Таблиця 4.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з LAMBDA-X						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	16							+
2	Велика кількість постачальників	15					+		
3	Висока якість	17				+			
4	Технічне обслуговування	18			+				
5.	Ціна	15						+	

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін показав, що фактор конкурентоспроможності нашого проекту слабший ніж у LAMBDA-X, тому є необхідність розвиватися в цих напрямках. Сильними факторами конкурентоспроможності можна віднести – ціну, обслуговування та необхідність проекту.

Таблиця 4.13. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Дешевизна 2. Простота 3. Прилад є ремонторпидатним, зручним в управлінні та простоті набуття навичок. 	<p>Слабкі сторони:</p> <p>Можливі проблеми в реалізації методу в деяких областях.</p> <p>Необхідність закупівлі деяких комплектуючих для високої якості.</p>
--	---

<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вихід на міжнародний ринок. 2. Отримання державних замовлень на отримання послуг. 3. Розширення ринку за рахунок іноземних замовників. 4. Підвищення якості обслуговування клієнтів для знаходження нових потенційних клієнтів. 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку. 2. Різка зміна курсу гривні може привести до зменшення попиту, особливо з боку деяких приватних компаній. 3. Політичні та економічні ризики ведення бізнесу; 5. Зменшення продаж через несвоєчасне виконання замовлень.
--	---

Ринкові загрози і ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу чинників, і, на відміну від них, ще не реалізованими, мають певну імовірність здійснення.

Тому: зниження доходів потенційних підприємств - фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі методу і відповідно - цінової конкуренції.

Таблиця 4.14. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Потреби споживачів	Потреби споживачів обумовлюють необхідність розробки проекту
2	Ціна та собівартість продукції	Рівень цін повинен бути менший ніж ціни конкурентів
3	Точність	Точність має бути не меншою ніж у конкурентів
4	Маркетинговий потенціал	Створити гарний імідж компанії
5	Простота експлуатації	Метод повинен бути простим у використанні для будь-яких користувачів
6	Технічне обслуговування	Міжнародна технічна допомога та обслуговування клієнтів
7	Безпечність	Рівень безпечності має бути не меншим ніж у конкурентів

Результат обґрунтування факторів конкурентоспроможності показав, що існує фактор потреби споживачів, який обумовлює необхідність розробки проекту. Цей проект повинен конкурувати в ціні та собівартості, бути безпечним, точним, а також вийти на міжнародний рівень

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Для розробки стратегії яка дозволить нам впевнено триматися на ринку треба провести вибір і аналіз нашої цільової аудиторії на яку буде орієнтуватися наш маркетинг. Результати наведені у таблиці 4.15:

Таблиця 4.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Медичні установи	Необхідність контролю інтраокулярних лінз	Високий попит на ринку	Велика конкуренція	Важко
2	Промисловість та аграрні групи	Заміна закордонних стендів.	Середній попит на ринку	Середня конкуренція	Середня важкість
Які цільові групи обрано: Медичні установи, промисловість та аграрні групи.					

Медичні установи було обрано за цільові, незважаючи на важкість входу у сегмент, через те що в цих групах достатньо великий попит та необхідність використання відносно дешевих установок для контролю якості. Але не зважаючи на велику конкуренцію в промисловості та аграрного сектору, все рівно є шанси захопити цей сегмент потенційних клієнтів. Виходячи з стратегії охопленням ринку, можемо стверджувати, що компанія працює із всім ринком.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку.

Визначемо стратегію подальшого розвитку підприємства. Результати таблиця 4.16:

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Належна якість	Наростаюча	Невисока ціна	Стратегія диференціації

Реалізація цієї стратегії вимагає, як правило, більш високих витрат. Проте успішна диференціація дозволяє компанії домогтись більшої рентабельності за рахунок того, що ринок готовий прийняти більш високу ціну (цінову премію бренду).

Для розуміння і успішного конкурування на ринку необхідно розробити базову стратегію поведінки на ринку. Результати таблиця 4.17:

Таблиця 4.17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Забирати існуючих у конкурентів	Буде здійснено покращення існуючих методів, а	Стратегія заняття конкурентної ніші

			також приладів для відповідних цілей	
--	--	--	--------------------------------------	--

Ніша, для того, щоб вона була привабливою для компанії, повинна задовольняти умовам:

- бути досить прибутковою, щоб робити доцільним процес виробництва і обслуговування;
- залишатися стабільною упродовж тривалого проміжку часу;
- має бути добре захищеною, мати високі вхідні бар'єри;
- бути непривабливою для конкурентів;
- відповідати цілям і ресурсам компанії, її специфічним можливостям.

Після проведення усіх необхідних аналізів ринку, треба розробити стратегію для успішного позиціонування на ринку. Результати наведені у таблиці 4.18:

Таблиця 4.18. Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Висока точність, надійність	Стратегія диференціації	Висококонкурентна точна апаратура для вимірювання стану зносу контактних дрітків	Точність, надійність, якість.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

В цьому розділі буде розглянуто потенційну маркетингову програму розвитку даного стартап-проекту.

Визначимо ключові переваги концепції нашого товару. Результати таблиця 4.19:

Таблиця 4.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Точне вимірювання дифракційного профілю лінз	Точне вимірювання дифракційного профілю лінз	Визначення дифракційного профілю лінз для високої якості зображення
2	Простота в керуванні	Доступність новим користувачам	Наявність інструкцій з усіма режимами та функціями приладу
3	Потреба клієнтів	Якісні системи контролю	Більш точні системи контролю, за спрощеною схемою

Формування маркетингової концепції товару показала, що для підприємств у яких буде впроваджений даний стартап-проект буде задовольнятися потреба у точному вимірюванні якості поверхні та у простоті керування методом, що дуже цікаво не тільки молодим підприємствам, а й вже зарекомендувавших себе на ринку.

Таблиця 4.20. Початкові витрати проекту

№ з/п	Стаття витрат	Обсяги витрат в 0-й рік, тис. грн.
1.	Розробка проектних матеріалів	50
2.	Робоче проектування і прив'язка проекту	50
3.	Витрати на придбання обладнання та устаткування та пристроїв	150
4.	Витрати на приймально-здавальні випробування	25
5.	Витрати на придбання нематеріальних активів	70
6.	Оплата юридичних послуг	20
7.	Витрати на передвиробничі маркетингові дослідження і створення збутової мережі	20
8.	Витрати, пов'язані формуванням команди	50
Разом		435

Таблиця 4.21. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	10-20 тис \$	20-25 тис \$	30-50 тис \$	7-19 тис \$

При визначенні меж встановлення ціни з'ясувалося, що рівень доходів цільової групи споживачів складає приблизно 30-50 тис. \$, товари-замінники коштують – 10-20 тис. \$, аналоги – 20-25 тис \$, верхня та нижня межа встановлення ціни на товар складає 7-19 тис. \$, що дає перевагу над товарами-замінниками та товарами-аналогами.

Таблиця 4.22. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	На сьогоднішній день споживачі купують продукт безпосередньо у науково-дослідницьких інститутах або ж розробляють власну продукцію	Встановлення контактів зі споживачами	Канал нульового рівня (виробник безпосередньо продає товару клієнту)	Збут продукції відбувається шляхом виставлення продукції на спеціальних виставках

Необхідно розробити концепцію маркетингових комунікацій для залучення нових клієнтів і користувачів нашого продукту. Результати в таблиці 4.23:

Таблиця 4.23. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Клієнти дізнаються про нові продукції з наукових публікацій та патентів, з сайту розробника, по рекомендаціях та наукових виставок	Конференції та виставки, Інтернет	SMM, маркетинг	Представлення товару, його позиціонування з метою залучення клієнтів	«Чітко бачиш, добре працюєш»

Концепція маркетингових комунікацій показала, для того щоб популяризувати власну продукцію необхідно виступати на конференціях, публікувати дослідницькі статті, показувати продукцію на виставках, тобто показувати свою активну розробницьку наукову діяльність по різних джерелах. Завданням рекламного повідомлення має стати представлення товару відповідній аудиторії (підприємств).

4.6 Висновок до розділу 4

Виконавши загальний аналіз реалізації ідеї стартап-проекту з підвищенням якості вимірювань зносу контактних дротів, можна зробити загальні висновки.

Попит на продукцію (метод, та запатентований пристрій) доволі великий, адже точність роботи контактної мережі корелюється з своєчасною заміною пошкоджених частин в цих мережах, томує велика кількість зацікавлених підприємств. Після розрахунку та виробництваприладу для контролю стану геометричних розмірів та мікрodefektів, їх необхідно атестувати на якість і саме на цій завершальній стадії виробництва.

Конкуренція на ринку України в області військової техніки, , авіаційного та космічного сегменту є досить великою, адже вже є монополісти в цій області. Специфіка цих всіх сфер потребує спеціальних дозволів та випробувань, але незважаючи на це, все рівно є фактори конкурентоспроможності, що робить можливим вихід на ринок, адже є потреба у підприємств, які використовують методи контролю, починаючи від, аграріїв та закінчуючи авіаційними та космічними приладами.

В якості альтернативи впровадження проекту доцільно запропонувати (продавати) її конкурентам, адже точне вимірювання ступеню зносу дротів, є дуже важливою задачею, для уникнення фінансових втрат та інших проблем, що можуть з'явитися при не точному контролі мікрodefektів та зносу контактних дротів. Подальша імплементація є доцільною, оскільки технології та проекти в області оптичного контролю надзвичайно популярні та продовжують розвиватися.

ВИСНОВКИ

На основі аналітичного огляду існуючих та нових вимог до конструкції дифракційних лінз були розроблені теоретичні основи вимірювання характеристик дифракційних лінз та проведено обґрунтування доцільності їх тестування.

Після детального порівнянні існуючих засобів для дослідження характеристик дифракційних лінз, було обрано оптичну схему, за якою найбільш простіше виконувати відповідні вимірювання.

Нововведенням є використання в якості приймача зображення USB-мікроскопа. USB-мікроскоп дозволяє значно полегшити процес вимірювання завдяки прямому підключенню до комп'ютера.

Було успішно здійснено тестування оптичної системи стенду та проведено роботу по створенню методичних матеріалів для роботи зі стендом. За необхідністю стенд можна трансформувати в компактний прилад, який би не поступався відомим аналогам.

Якість зображення дифракційних лін оцінюється модуляційною передавальною функцією. Тому були проведені експериментальні дослідження, які дали змогу виміряти цей параметр досліджуваних лінз.

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено економічний та компактний стенд для дослідження оптичних характеристик дифракційних лінз, який відповідає вимогам завдання та має комерційну перспективу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Колобродов В. Г. ХВИЛЬОВА ОПТИКА ЧАСТИНА 2. ДИСПЕРСІЯ І ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА / Валентин Георгійович Колобродов. – Київ: НТУУ «КПІ ІМ. І. СІКОРСЬКОГО», 2018. – 231 с.
2. Васильковська І. О. Удосконалення методів проектування дифракційних лінз : дис. канд. техн. наук : 05.11.07 / Васильковська Інна Олегівна – Київ, 2019. – 182 с.
3. Brunner R. Transferring diffractive optics from research to commercial applications: Part I – progress in the patent landscape / R. Brunner // Adv. Opt. Techn, 2013. – Vol.5-6, No.2. – P.351-359.
4. Минин И.В. Конформная дифракционная квазиоптика: от миллиметровых волн до фокусировки ударных волн / И.В. Минин, О.В. Минин // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2012. – №2. – С.257-261
5. Скиданов Р.В. Изображающие системы на основе гармонических линз с кольцевой апертурой / Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.В. Грачевская // Мир Голографии, 2017. – Том 3, № 1. – С.48-49.
6. ИНТРАОКУЛЯРНЫЕ ЛИНЗЫ [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ofthalmika.com/intraokulyarnye-linzy/>.
7. David F. C. Mastering Refractive IOLs / F. C. David, J. D. Steven. – Thorofare: SLACK Incorporated, 2008. – 884 с.
8. Колобродов В. Г. ПРИКЛАДНА ДИФРАКЦІЙНА ОПТИКА / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – 312 с.
9. ISO 11979 ISO 11979-2:2014. Ophthalmic implants — Intraocular lenses — Part 2: Optical properties and test methods. 2014. 22 p.
10. Колобродов В. Г. СТЕНД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ІНТРАОКУЛЯРНИХ ЛІНЗ / В. Г. Колобродов, Є. О. Кучугура. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2014. – №47. – С. 64–72.
11. Иванов М.И., Шевелев А.Ю. Формула расчета оптической силы ИОЛ // Вестник офтальмологии. - 2003. - № 4. - С. 52-54.

12. Рефрактометри: основні характеристики [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.systopt.com.ua/refraktometry-osnovni-harakterystyky/>.
13. Хомутов В. Н. ИЗМЕРЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОО ПО МНОГИМ ПОРЯДКАМ ДИФРАКЦИИ / В. Н. Хомутов, А. Г. Полещук, В. В. Черкашин // Компьютерная оптика / В. Н. Хомутов, А. Г. Полещук, В. В. Черкашин. – Новосибирск: Институт Автоматики и Электрметрии СО РАН, 2011. – (Компьютерная оптика). – (2; т. 35). – С. 196–202.
14. ImageMaster® VISION [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://trioptics-usa.com/products/ophthalmic/imagemaster-vision/>.
15. OptiSpheric® IOL [Електронний ресурс]. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: http://trioptics-usa.com/wp-content/uploads/OptiSpheric_IOL_2012.pdf.
16. IOLAPlus [Електронний ресурс]. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.rotlex.com/iola-plus-a>.
17. Промисловий прилад для тестування ІОЛ «IOL-5000» <http://www.hellopro.co.uk/Optikos-3015-noprofil2001679-14589-0-1-1-fr-societe.html>
18. Metricon 2010/M [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.metricon.com/model-2010-m-overview>.
19. NimoTR0815 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.lambda-x.com/en/nimo-tr0815-nimo-visu>.
20. Інтраокулярні лінзи: як вибрати найкращий ІОЛ для вашої хірургії катаракти [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://uk.drderamus.com/89012-intraocular-lenses-how-choose-best-iol>.
21. ЧТО ТАКОЕ ЛИНЗА ФРЕНЕЛЯ? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mymagnifier.com/ru/faq/E-TAY-faq-001.html>.
22. Кучугура І. О. Розробка методу розрахунку дифракційних лінз / В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011.– №5. – С.115–119.

23. Кучугура І. О. Метод проектування фазових дифракційних ґраток / С. Т. Коваль, В. Г. Колобродов, І. О. Кучугура // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». – 2013. – Вип. 46. – С.86–90.
24. Кучугура І. О. Метод оцінки модуляційної передавальної функції трифокальної інтраокулярної лінзи / В.Г. Колобродов, І.О. Кучугура, В. І. Микитенко, Є. А. Сірий // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – №2. – С.99–102.
25. Вовчок І. О. Перспективні дифракційні технології / І. О. Вовчок, О. І. Чікіда. // XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». Матеріали конференції. – Київ, 2019. – С. 67–69.
26. Вовчок І. О. Сучасний стан ринку дифракційних лінз / О. І. Чікіда, І. О. Вовчок. // XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». Матеріали конференції. – Київ, 2019. – С. 92–94.