

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ОКО-ЛІНЗА ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО
ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ
ІНТРАОКУЛЯРНИХ ЛІНЗ
(тема)

Виконала:
студентка 2 курсу, групи ЛОЕТмз-22-1
Ємельянова К.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-
вимірвальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна
техніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентці Ємельяновій Катерині Віталіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Створення моделі око-лінза для подальшого проєктування та розрахунку основних параметрів інтраокулярних лінз

затверджена наказом університету від « 08 » листопада 2023 р. № 247 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 24 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Дифракційна ІОЛ загального вигляду; модель ока; модель ІОЛ згідно ISO.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Види інтраокулярних лінз.

2 Основна концепція дизайну. 3 Модельовання роботи ІОЛ у моделі ока.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 31 с; 14 рис; 1 додаток; 19 джерел.

ІОЛ, КАТАРАКТА, ДИФРАКЦІЯ, БІФОКАЛЬНА ЛІНЗА, КІЛЬЦЕВА ЗОНА, ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ, ПОРЯДОК-ДЕКОМПОЗИЦІЯ, ЗОНА-ДЕКОМПОЗИЦІЯ, ОФТАЛЬМОЛОГІЧНИЙ ІМПЛАТ, ДІАФРАГМА.

Об'єкт дослідження – око-лінза та розрахунки основних параметрів інтраокулярних лінз.

Мета роботи – створити модель око-лінза для проектування та розрахунку основних параметрів інтраокулярних лінз.

Метод дослідження – теоретичний із застосуванням пакетів моделювання оптичних систем.

У першому розділі розглянуто види інтраокулярних лінз, які діляться на дифракційні ІОЛ, рефракційні монофокальні ІОЛ та біфокальні ІОЛ.

У другому розділі ознайомилися з основними концепціями дизайну; розглянули порядок-декомпозиції та зону-декомпозиції; розглянули модель дифракційної поверхні за допомогою UDS DLL; ознайомилися з алгоритмом поширення променів.

У третьому розділі демонстрували моделювання роботи ІОЛ у моделі ока за допомогою біфокальних конструкцій ІОЛ; розробили стандартну модель ока ISO для тестування на виробничій лінії; порівняли її з вбудованими моделями дифракційної поверхні; демонструючи поліхроматичні результати ми проаналізували продуктивність системи у видимому спектральному діапазоні.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 31 p.; 14 Fig; 1 appendix; 19 sources.

IOL, CATARACT, DIFFRACTION, BIFOCAL LENS, RING ZONE, INTERFERENCE, ORDER-DECOMPOSITION, ZONE-DECOMPOSITION, OPHTHALMIC IMPLANT, DIAPHRAGM.

The object of research is the eye-lens and calculations of the main parameters of intraocular lenses.

The purpose of the work is to create an eye-lens model for designing and calculating the main parameters of intraocular lenses.

Research method - theoretical with the use of optical systems modeling packages.

In the first chapter, we considered the types of intraocular lenses, which are divided into diffractive IOLs, refractive monofocal IOLs and bifocal IOLs.

In the second chapter, we familiarized ourselves with the basic design concepts; considered the order-decomposition and zone-decomposition; considered the diffraction surface model using UDS DLL; got acquainted with the ray propagation algorithm.

In the third section, modeling of IOL operation in an eye model using bifocal IOL designs was demonstrated; developed a standard ISO eye model for testing on the production line; compared it with built-in models of the diffraction surface; demonstrating polychromatic results, we analyzed the performance of the system in the visible spectral range.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 7 |
| 1 Види інтраокулярних лінз..... | 9 |
| 1.1 Дифракційні інтраокулярні лінзи..... | 9 |
| 2 Вдосконалення технологій тривимірного лазерного сканування..... | 13 |
| 2.1 Порядок – декомпозиція..... | 13 |
| 2.2 Зона – декомпозиція..... | 14 |
| 2.3 Модель дифракційної поверхні за допомогою UDS DLL..... | 15 |
| 2.4 Алгоритм поширення променів..... | 17 |
| 3 Моделювання роботи ІОЛ у моделі ока..... | 19 |
| 3.1 Біофокальна конструкція ІОЛ..... | 19 |
| 3.2 Стандартна модель ока ISO для тестування на виробничій лінії..... | 22 |
| 3.3 Порівняння зі вбудованими моделями дифракційної поверхні..... | 24 |
| 3.4 Поліхроматичні результати..... | 27 |
| Висновки..... | 28 |
| Перелік джерел посилання..... | 30 |
| Додаток А Демонстраційний матеріал..... | 32 |

ВСТУП

Інтраокулярні лінзи (ІОЛ) — це медичні пристрої, які хірургічним шляхом імплантують в очі пацієнтів із такими захворюваннями, як катаракта або короткозорість. По суті, це пластикові лінзи, ІОЛ можна використовувати для заміни природного кришталіка в оці, коли він помутніє, що спричиняє погіршення зору. У цій роботі буде продемонстровано, як користувачі можуть використовувати поверхню Binary 2 для моделювання інтраокулярної лінзи.

Інтраокулярні лінзи (ІОЛ) можна використовувати для заміни природного кришталіка в оці, коли він помутніє, що спричиняє погіршення зору. Помутніння кришталіка називається катарактою, а ІОЛ, яка в цьому випадку замінює кришталік, називається псевдофакічною інтраокулярною лінзою. ІОЛ також можна використовувати для корекції зору осіб з короткозорістю, гіперметропією або астигматизмом.

Роки досліджень і розробок привели до створення безлічі дизайнів ІОЛ. OpticStudio надає дизайнерам чудовий інструмент для моделювання та аналізу ефективності більшості типів ІОЛ. Тут ІОЛ розміщується над природним кришталіком, таким чином змінюється його оптична сила; цей тип ІОЛ називається факічною інтраокулярною лінзою.

Відповідно до зростаючого попиту пацієнтів з катарактою виробники ІОЛ інвестують більше часу та ресурсів у дослідження та точний дизайн лінз преміум-класу.

Щоб забезпечити хорошу якість зображення в широкому діапазоні відстаней до об'єкта, кінцевою метою було б відтворити можливості акомодативної оригінального кришталіка. Безпосередня імітація природних процесів людського ока за допомогою штучних елементів стикається з кількома проблемами, тому це все ще невирішена проблема.

Однак дифракційні ІОЛ можуть забезпечити готове рішення для кількох відстаней перегляду одночасно.

У цій роботі показано, як реалізувати реалістичну модель дифракційних лінз рельєфного типу на основі реальної форми поверхні за допомогою трасування променів разом із дифракційним аналізом, а також демонструє переваги моделі для комплексної оцінки продуктивності системи.

ВИДИ ІНТРАОКУЛЯРНИХ ЛІНЗ

1.1 Дифракційні інтраокулярні лінзи

Рефракційні монофокальні ІОЛ забезпечують пацієнтам скоригований зір для бачення вдалину або поблизу. Однак проблема з цим дизайном полягає в неможливості виправити обидва одночасно. З цієї причини сучасні конструкції ІОЛ забезпечили альтернативний підхід: мультифокальні ІОЛ.

Ці лінзи забезпечують більш ніж одну оптичну силу, що дозволяє одержувачам фокусуватися на кількох діапазонах. Біфокальні ІОЛ є популярною ітерацією мультифокальної конструкції та мають дві оптичні сили: одну для зору поблизу, а іншу — для зору вдалину. У цій статті ми зосередимо увагу на біфокальних конструкціях ІОЛ.

Біфокальні ІОЛ працюють, використовуючи дифракційну природу світла. Нагадуємо, коли різні світлові хвилі поширюються та збігаються в одному місці, вони інтерферують. Ця інтерференція може бути деструктивною або конструктивною (або частковою зміною того чи іншого) і є функцією довжини оптичного шляху окремих світлових хвиль.

Для різниці оптичного шляху, наприклад, у половину довжини хвилі, інтерференція між двома збігаючими хвилями буде повністю руйнівною та призведе до нульової інтенсивності. Біфокальні конструкції ІОЛ стратегічно використовують ці концепції. Лінзи розроблені з основною оптичною силою та мають концентричні кільцеві зони принаймні на одній поверхні. Світло, що проходить через ці кільцеві зони, контролювано інтерферує з оптичними «кроками» між зонами. Нижче наведено ескіз біфокальної ІОЛ, на якому показано асферичну поверхню та кільцеві зони на лінзі (розмір кілець перебільшений) (рис. 1.1).

Щоб зрозуміти, як працює дифракційна ІОЛ, розгляньте ескіз нижче, на якому зображено лінзу з рівномірно розташованими кільцями. У кожному другому кільці є сходи́нка, яка додає $1/2$ хвилі до довжини оптичного шляху променя, що проходить через нього.

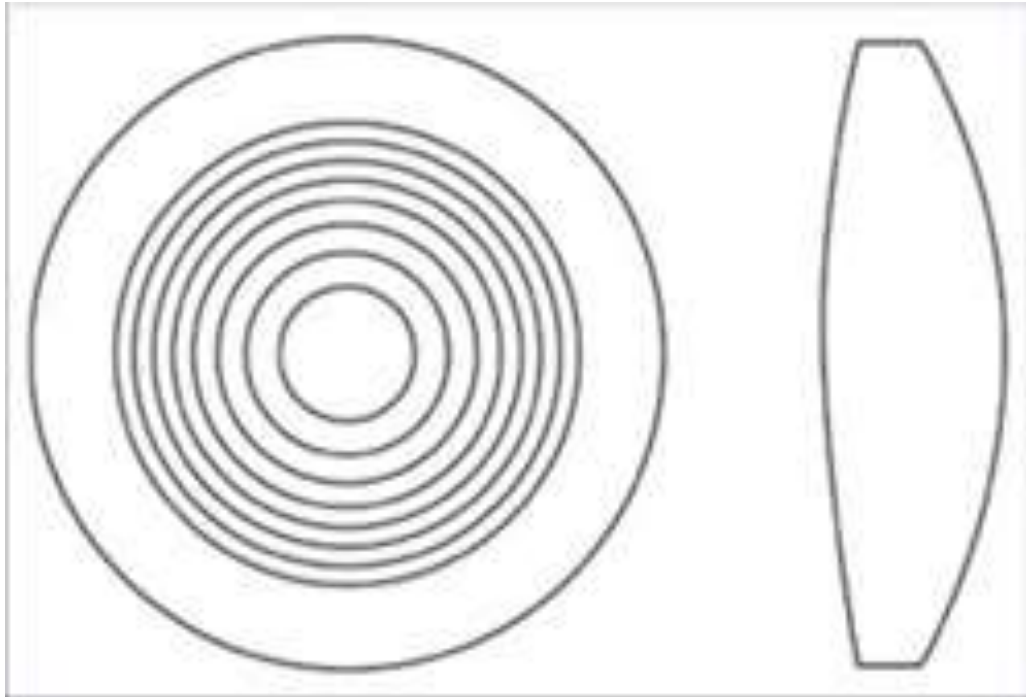


Рисунок 1.1 – Ескіз біфокальної ІОЛ

Це створює дві лінзи, які фокусуються в одному місці, але зміщені по фазі одна з одною рівно на $1/2$ хвилі. У цьому фокусі відбувається деструктивне втручання, і в цій точці немає інтенсивності.

Наприклад, у точці А на ескізі нижче різниця фаз між двома променями, які проходять через два зовнішні кільця, може становити рівно $1/2$ хвилі, і виникне руйнівна інтерференція (рис. 1.2)

Далі вздовж осі, однак, у точці В різниця довжин шляху між двома зовнішніми кільцями може бути 0, і може виникнути конструктивна інтерференція. Кілька фокусів відповідають різним порядкам дифракції лінзи.

Висоту кожної сходинок можна регулювати для створення фокусів у бажаних місцях.

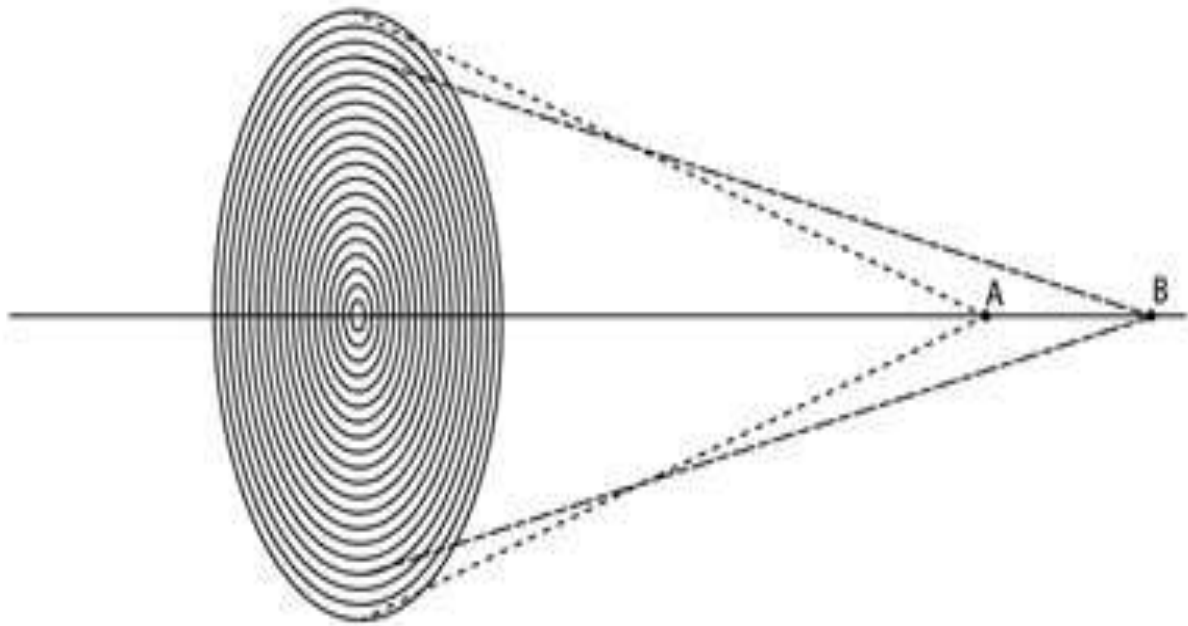


Рисунок 1.2 – Дифракційна ІОЛ

Висоту кожної сходинок можна регулювати для створення фокусів у бажаних місцях. Для конструкції ІОЛ висота та форма ступенів вибираються так, щоб створити два фокуси на сітківці ока: один для ближньої точки ока, а інший для об'єктів, розташованих далеко.

В оці завжди присутні обидва вогнища. Коли об'єкт знаходиться поблизу глядача, одне зображення перебуває у фокусі, а інший фокус створює розфокусоване зображення на сітківці. Мозок вчиться ігнорувати розфокусоване зображення та зосереджуватися на зображенні у фокусі.

Інші вогнища від дифракційної ІОЛ також присутні в оці. Точну форму поверхні кожного кільця в ІОЛ можна вибрати так, щоб максимізувати інтенсивність у двох порядках, які використовуються, і мінімізувати інтенсивність в інших порядках.

Проте OpticStudio змінює фази променів, але безпосередньо не моделює форму поверхні кожного кільця. OpticStudio передбачає, що кожне замовлення

містить 100 % інтенсивності інциденту. Щоб обчислити інтенсивність, яка фактично присутня в кожному порядку дифракції для лінзи, необхідно використовувати інше програмне забезпечення для моделювання[1–3].

2 ОСНОВНА КОНЦЕПЦІЯ ДИЗАЙНУ

2.1 Порядок-декомпозиція

Вбудовані моделі дифракційної поверхні в послідовному режимі OpticStudio покладаються на порядок-декомпозицію, де потрібно вибрати один порядок дифракції, а потім дифракційна потужність представлена додатковим внеском фази, незалежно від показника заломлення та поверхні. провисати. Використовуючи цей метод, поширення порядків можна моделювати або променями від об'єкта до зображення, або скалярною дифракцією від вихідної зіниці. Цей підхід забезпечує просте рішення для аналізу окремих порядків, що є корисним у додатках, що використовують один цільовий порядок дифракції.

Однак є деякі недоліки вищезгаданої моделі порядку-декомпозиції. По-перше, оскільки фазова функція просто застосовує додатковий вигин до променів на верхній частині базової заломлюючої або відбивної поверхні, ця модель не враховує реальний шлях променя через дифракційний елемент, і тому дисперсія довжини хвилі, а також деякі інші аберації нехтуються. Крім того, ця модель поверхні не враховує ефективність дифракції. Нарешті, необхідно створити багатоконфігураційну систему для моделювання різних порядків дифракції один за одним (рис. 2.1) [4–5].

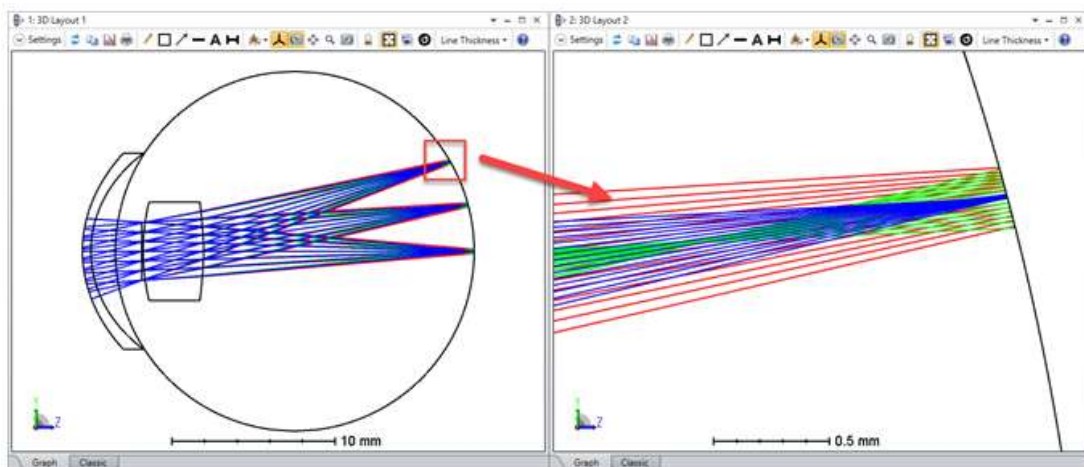


Рисунок 2.1 – Багатоконфігураційна система для моделювання різних порядків дифракції

2.2 Зона-декомпозиція

Навпаки, використовуючи зонну декомпозицію, дифракція на кілька порядків може бути точно розглянута одночасно, і цей метод за своєю суттю враховує дисперсію довжини хвилі та ефективність дифракції шляхом моделювання фактичної форми дифракційного елемента. Це дає змогу створювати передові моделі ІОЛ, у яких різні порядки розроблені для забезпечення чіткого зору на кількох відстанях перегляду, таким чином замінюючи акомодацию.

Модель зонного розкладання припускає, що ширина зони дифракційного елемента набагато більша за довжину хвилі, і що оптичні властивості поведуться гладко в межах зон. У цьому випадку наближення геометричної оптики і, отже, трасування променів можна використовувати для опису поширення від однієї сторони дифракційної поверхні до іншої. Це також означає, що зони можна розглядати як звичайні заломлюючі/відбиваючі оптичні елементи в ближньому полі, тоді як у дальньому полі розподіл світла можна розрахувати лише за допомогою скалярного дифракційного аналізу [6–8].

У OpticStudio обчислення PSF реалізують саме цей процес, коли трасування променів виконується через систему, а також розглядається однокроковий аналіз дифракції від вихідної зіниці до площини зображення.

Оскільки зміни фази через дифракційний елемент розраховуються на основі геометричної оптики, зонна декомпозиція є найбільш актуальною, коли дифракційна поверхня розташована на вихідній зіниці або в одному з її сполучених положень (вхідна зіниця або межа діафрагми).

Конструкція та моделювання ІОЛ є відповідним випадком використання, який відповідає вищевказаним критеріям, оскільки імплантований штучний кришталік зазвичай розміщується відразу після зіниці, яка є межею діафрагми ока.

Відповідно до загальноприйнятої практики, коли дифракцією Френеля між межею апертури та вихідною зіницею нехтують, зонну декомпозицію можна використовувати для ефективного моделювання дифракційних ІОЛ (рис. 2.2)[9].

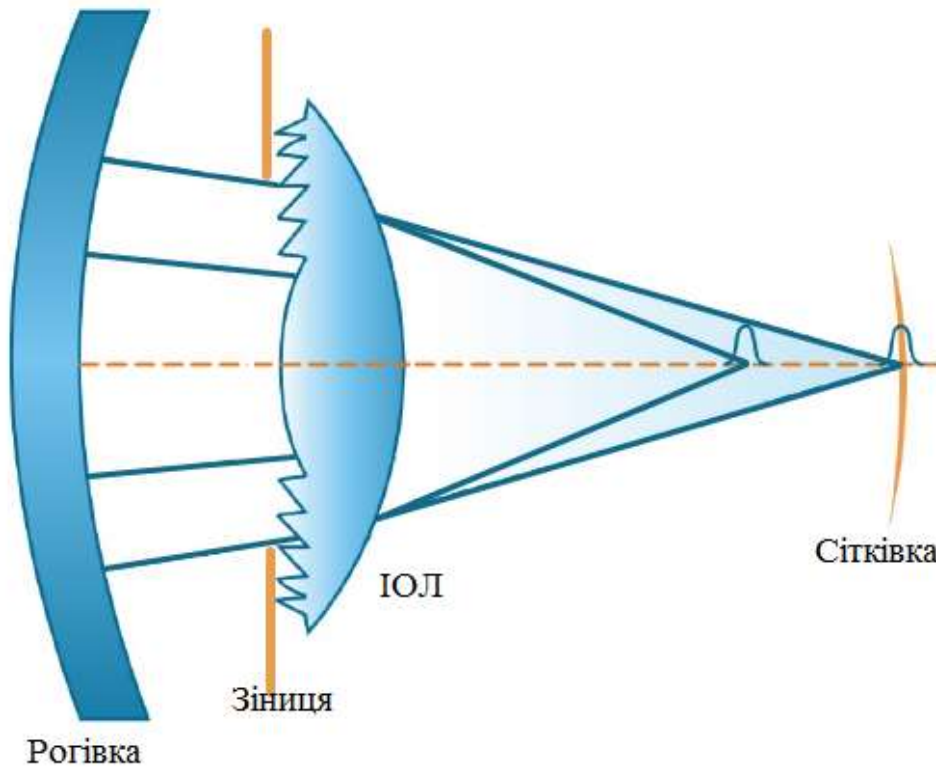


Рисунок 2.2 – Моделювання дифракційних ІОЛ

2.3. Модель дифракційної поверхні за допомогою UDS DLL

Щоб скористатися перевагами вищеописаного методу зонної декомпозиції, я реалізувала нову користувальницьку поверхневу бібліотеку DLL, де профіль прогину дифракційних поверхонь рельєфного типу можна описати аналітично. Окрім точного аналізу характеристик дифракційних оптичних елементів (DOE), параметричне представлення форми за допомогою UDS DLL також дає змогу оптимізувати та аналізувати допуски цих дифракційних поверхонь.

Під час використання послідовних поверхневих DLL існує десять різних способів взаємодії OpticStudio та обміну даними з DLL. Ці сценарії представляють загальну інформацію, назву параметра та безпечну передачу даних, а також обчислення діаграми макета, параксіального та реального трасування променів. Різні функціональні можливості визначені в різних випадках DLL.

У цій моделі застосовано просту ротаційно-симетричну дифракційну структуру з рівномірною висотою рельєфу, додану поверх стандартної поверхні, що представляє підкладку.

Щоб порівняти модель із вбудованими рішеннями OpticStudio, я описала форму рельєфу поліномами парної сфери. Відповідно, прогин поверхні визначається наступним рівнянням:

$$z = z_{cubic} + z_{DOE} = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \text{mod}(a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + a_5r^{10}, c), \quad (2.1)$$

де mod – функція за модулем;

c – кривизна, тобто величина, зворотна радіусу,

k – кінчна константа;

r – радіальна координата;

h – рівномірна висота рельєфної сходинки.

Коефіцієнти a_i поліномів парної сфери, висота кроку h та індикатор алгоритму розповсюдження спочатку визначаються у випадку 1, імена заголовків стовпців параметрів, у DLL. Потім Випадок 3 використовується для опису прогину поверхні на основі наведеного вище рівняння з метою малювання на схемах компонування. Випадок 4 повинен враховувати результати параксіального трасування променів, але оскільки дифракційний аналіз потрібен на додаток до трасування променів для підходу зонного розкладання, який доступний лише для реального трасування променів, ми проігнорували цей

крок. Це означає, що в параксіальному наближенні наша модель поводить ся як стандартна поверхня. Нарешті, у випадку 5 обчислюються реальні результати трасування променів. Для цього ми реалізували два рішення, апроксимативний аналітичний та ітераційний алгоритми, які обговорюються нижче [10–12].

2.4 Алгоритм поширення променів

У разі складних форм поверхні координати перетину променів із поверхнею неможливо визначити аналітично, тому для вбудованих типів поверхонь, відмінних від стандартної поверхні, OpticStudio застосовує ітераційний алгоритм для пошуку чисельного рішення.

Це також може бути одним із підходів для DLL, визначених користувачем. Однак, оскільки ітераційний метод обчислювально менш ефективний, ніж прямий розрахунок, окрім зазвичай застосовуваного ітераційного рішення, ми також реалізували апроксимаційне рішення закритої форми, засноване на локальній лінеаризації.

В останньому альтернативному алгоритмі ми обробляємо прогин основи та додатковий рельєф окремо. Спочатку ми визначаємо точні координати перетину променів із підкладкою (x_0, y_0, z_0) , що можна зробити аналітично, оскільки підкладка має стандартну форму поверхні. Потім, як наступний крок, ми оцінюємо точку перетину променів рельєфу на основі локальної висоти рельєфу $(\Delta z = z_{DOE}(x_0, y_0))$ і нахилу в заданому місці $(x_0, y_0, z_0 + \Delta z)$. Очікувану точку перетину (x, y, z) із дотичною площиною можна знову обчислити аналітично, розв'язуючи лінійні рівняння. Це пряме наближене обчислення може бути на 30 % швидшим, ніж ітераційний метод за замовчуванням, не спричиняючи значних помилок у результатах. Процес візуалізовано на рис. 2.3 [13–14].

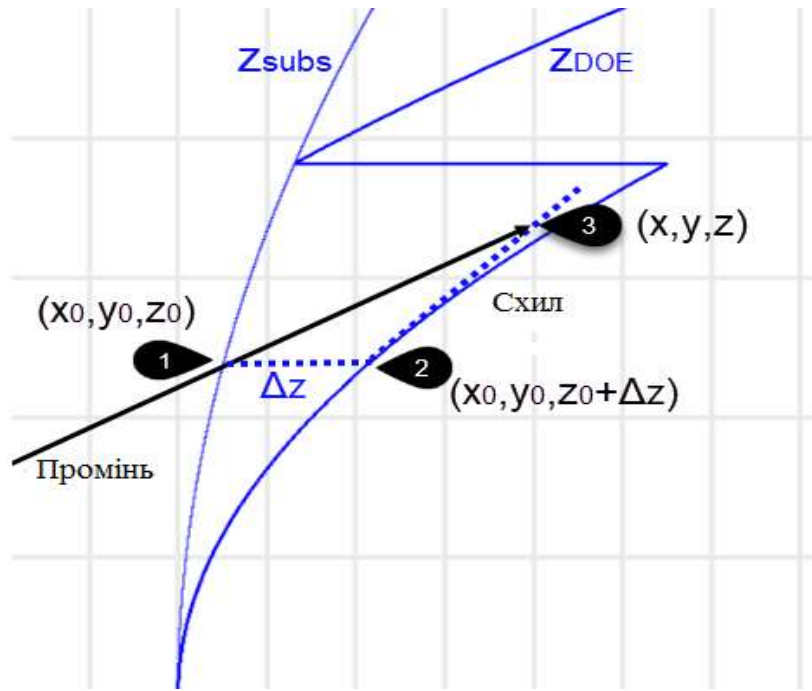


Рисунок 2.3 – Локальна лінеаризація

3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ІОЛ У МОДЕЛІ ОКА

3.1 Біфокальна конструкція ІОЛ

Щоб продемонструвати застосовність і переваги нової дифракційної поверхні DLL, ми реалізували модель ідеальної дифракційної лінзи, яка рівномірно розподіляє світло в нульовому та першому порядках дифракції на проектній довжині хвилі. (Хоча ці два порядки мають однакову потужність, застосована дифракційна поверхня також посиляє невелику частку потужності до вищих порядків.)

Відповідно до стандарту ISO для інтраокулярних лінз, ми встановлюємо основну довжину хвилі на лінію e, тобто $\lambda_0 = 546,07$ нм. ІОЛ була розроблена так, щоб мати базову силу заломлення $P_0 = 22,5$ D з дифракційним додаванням $P_{add} = 3,5$ D. Ми змоделивали матеріал лінзи, Benz25, використовуючи модельний матеріал із показником заломлення $n = 1,4625$, тоді як оточуючі середовища, природного сольового розчину, було описано розчином модельного матеріалу з показником заломлення $n_0 = 1,3343$.

Щоб отримати ідеальну лінзу, де перший порядок дифракції сфокусований на відстані EFL, оптична різниця шляху на межі зон j і $j+1$ відносно сферичного еталонного хвильового фронту Гаусса має становити $j\lambda$, що може бути геометрично виражене у вигляді наступного рівняння:

$$\sqrt{r_j^2 + E\Phi L^2} - E\Phi L = j\lambda . \quad (3.1)$$

Це означає, що межі зони знаходяться в таких місцях:

$$r_j^2 = 2E\Phi L \cdot j\lambda + (j\lambda)^2 . \quad (3.2)$$

Оскільки $EFL \gg \lambda$, можна знехтувати останньою частиною та застосувати наближення як:

$$r_j^2 \approx 2EFL \cdot j\lambda. \quad (3.3)$$

Отже, додавання оптичного шляху дифракційної поверхні для реалізації країв зони r_j вище та отримання 100 % дифракційної ефективності для першого порядку виглядає так:

$$\Delta OPL = n \cdot \text{mod} \left(\frac{r^2}{2EFL}, \lambda \right). \quad (3.3)$$

Щоб реалізувати однакову дифракційну ефективність для нульового та першого порядків, необхідно також враховувати постійний коефіцієнт множення $\alpha=0,5$. Отже, прогин поверхні ідеальної біфокальної дифракційної ІОЛ можна описати як:

$$z_{DOE}(r) = \text{mod} \left(\frac{\alpha n \cdot r^2}{2EFL(n-n_0)}, \frac{\alpha \lambda_0}{n-n_0} \right) \quad (3.4)$$

Виходячи з цього, у редакторі даних об'єктива ми встановили поліноміальний коефіцієнт 2-го порядку рівним $\alpha n / 2EFL(n-n_0) = 6,82E-3$, а висоту сходинок: $h = \alpha \lambda_0 / (n-n_0) = 2,13E-3$ мм. Додаток прогину дифракційного профілю, тобто карта прогину поверхні з видаленням базового радіуса, показано на рис. 3.1.

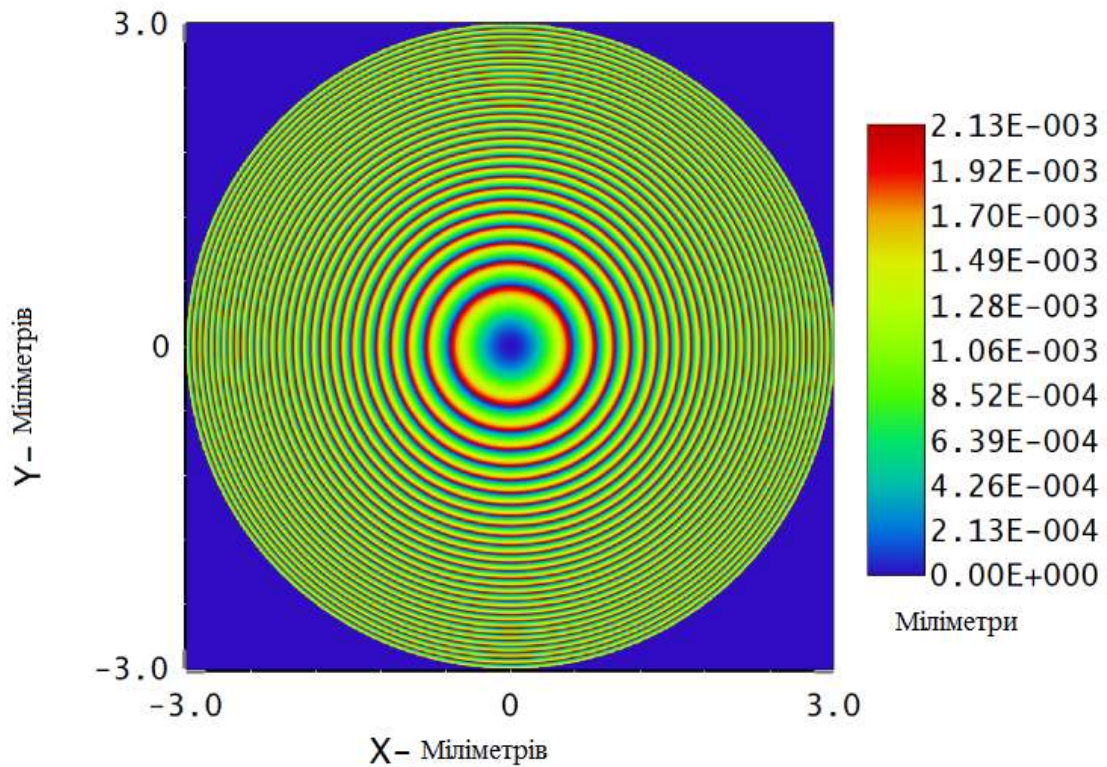


Рисунок 3.1 – Карта прогину поверхні з видаленням базового радіуса

Нарешті, радіус основи підкладки лінзи був розрахований за допомогою рівняння *Lensmaker*, припускаючи симетричну подвійну опуклу лінзу з товщиною 1,0 мм і $P_0 = 22,5$ D базової потужності. Це призводить до радіуса 11,353 мм.

Для кінчної константи було встановлено значення $k = 0$ на передній поверхні лінзи, а на задній поверхні її було оптимізовано для досягнення дифракційних обмежень для нульового порядку дифракції, що призвело до значення $k = -5,8$ [15–16].

3.2 Стандартна модель ока ISO для тестування на виробничій лінії

Щоб підтвердити модель ІОЛ, включимо дифракційну UDS DLL у стандартну модель ока ISO 11979-2, яка розроблена для виробничого тестування оптичних властивостей офтальмологічних імплантатів (рис. 3.2). Модель ока містить рогівку практично без аберцій, після чого ІОЛ поміщають у рідке середовище між двома плоскими вікнами (рис. 3.3).

| | Surface Type | Comment | Radius | Thickness | Material | Coating | Clear Semi-Dia | Chip Zone | Mech Semi-Dia | Conic |
|----|--------------|----------------|--------------------------|--------------|------------|------------|----------------|-----------|---------------|-----------|
| 0 | OBJECT | Standard ▾ | Infinity | Infinity | | | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 |
| 1 | | Standard ▾ | Infinity | 5.000000 | | | 2.611049 | 0.000000 | 2.611049 | 0.000000 |
| 2 | (aper) | Standard ▾ | cornea | 24.590000 | SSK4 | | 8.000000 U | 0.000000 | 8.000000 | 0.000000 |
| 3 | (aper) | Standard ▾ | | -15.580000 | SF8 | | 8.000000 U | 0.000000 | 8.000000 | 0.000000 |
| 4 | (aper) | Standard ▾ | | -90.200000 | | | 8.000000 U | 0.000000 | 8.000000 | 0.000000 |
| 5 | (aper) | Standard ▾ | window | Infinity | BK7 | | 16.000000 U | 0.000000 | 16.000000 | 0.000000 |
| 6 | (aper) | Standard ▾ | aqueous | Infinity | 1.33,0.0 M | | 16.000000 U | 0.000000 | 16.000000 | 0.000000 |
| 7 | STOP (aper) | Standard ▾ | pupil | Infinity | 1.33,0.0 P | | 1.500000 U | 0.000000 | 1.500000 U | 0.000000 |
| 8 | (aper) | User Defined ▾ | us_ReliefDiffraction.dll | 11.353000 | 1.46,0.0 M | | 3.000000 U | - | - | 0.000000 |
| 9 | (aper) | Standard ▾ | aqueous | -11.353000 P | 9.000000 T | 1.33,0.0 P | 3.000000 U | 0.000000 | 3.000000 U | -5.800000 |
| 10 | (aper) | Standard ▾ | window | Infinity | BK7 | | 16.000000 U | 0.000000 | 16.000000 | 0.000000 |
| 11 | | Standard ▾ | | Infinity | | | 0.279868 | 0.000000 | 16.000000 | 0.000000 |
| 12 | IMAGE | Standard ▾ | retina | Infinity | | | 3.766720E-04 | 0.000000 | 3.766720E-04 | 0.000000 |

Рисунок 3.2 – Дифракційна UDS DLL

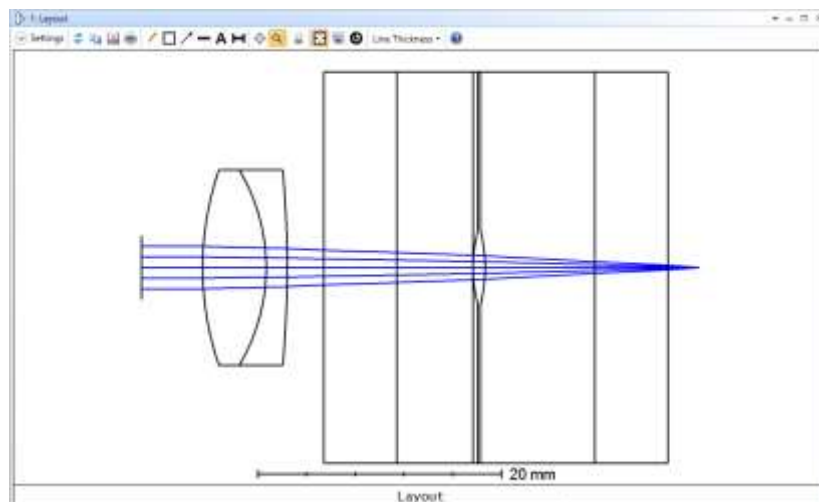


Рисунок 3.3 – Стандартна модель ока ISO 11979-2

Задню фокусну відстань системи було оптимізовано для найменшої середньоквадратичної помилки хвильового фронту за допомогою інструменту швидкого фокусування, що призводить до розташування зображення на півдорозі між нульовою та першою фокальними точками.

Це також виправдовує те, що крім трасування променів необхідний скалярний дифракційний аналіз для правильного опису поведінки лінзи в дальньому полі. Крім того, у цьому проміжному положенні карта хвильового фронту чітко показує різницю напівхвиль між сусідніми зонами, що добре узгоджується з теоретичними очікуваннями (рис. 3.4).

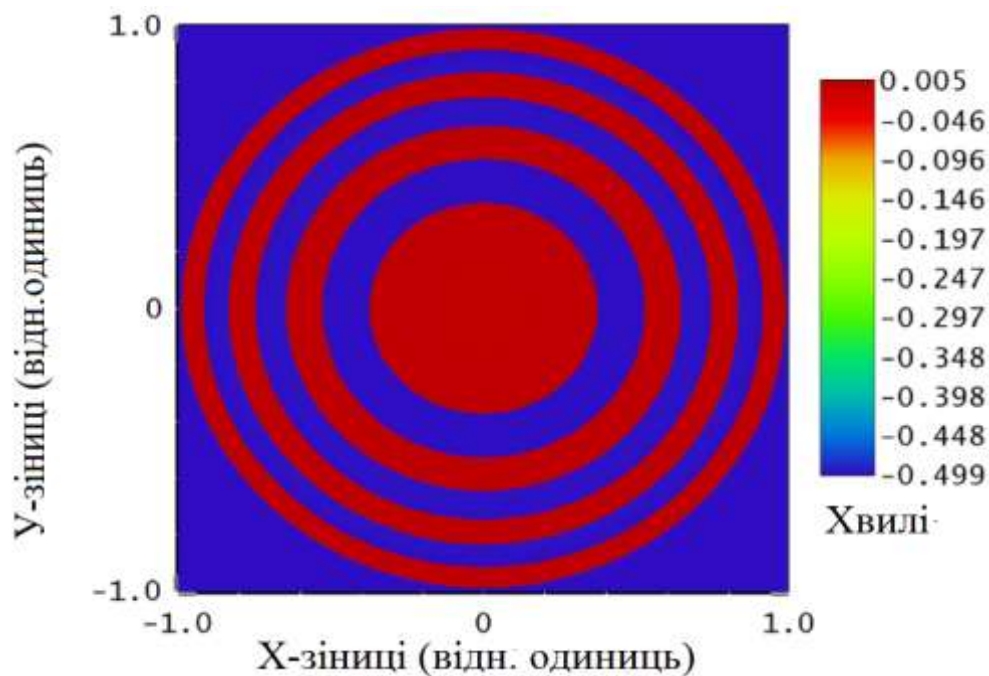


Рисунок 3.4 – Карта хвильового фронту

Коли враховуються ефекти дифракції, наприклад, через обчислення FFT PSF або MTF, усі порядки дифракції точно моделюються в одній конфігурації, а ефективність дифракції враховується за природою моделі.

На рис. 3.5 наведено результати аналізу FFT Through Focus MTF за частоти 50 lp/mm . Пікова ефективність дифракції 0,34 у фокальних площинах нульового та першого порядку близька до теоретичних значень [17].

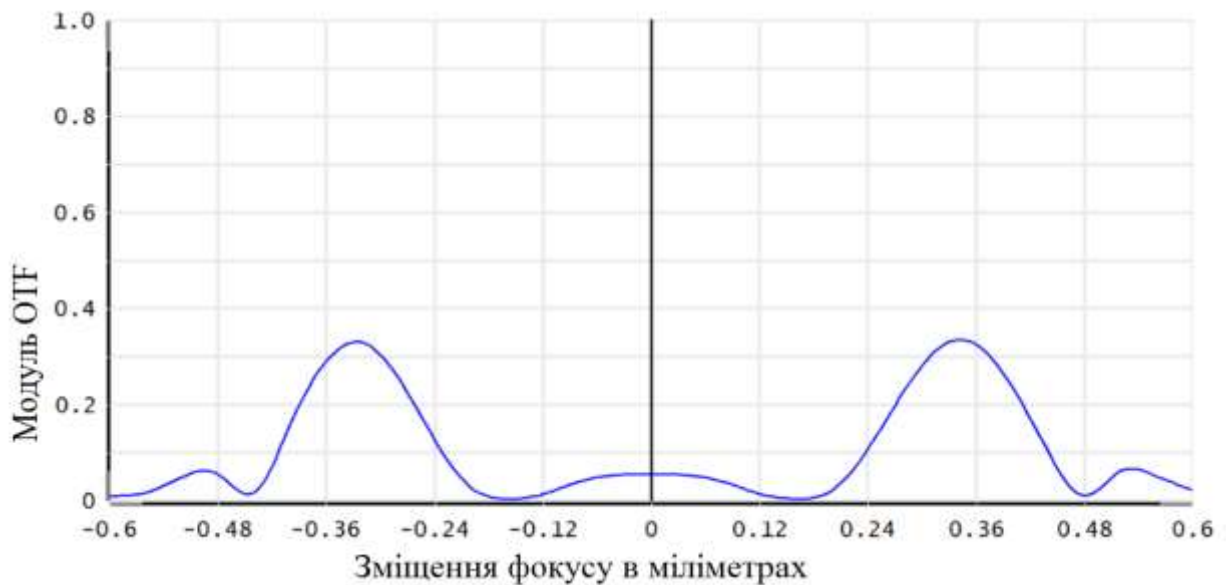


Рисунок 3.5 – Результати аналізу FFT Through Focus MTF
за частоти 50 lp/mm

3.3 Порівняння з вбудованими моделями дифракційної поверхні

Щоб порівняти нову реалістичну модель DLL UDS із вбудованими моделями дифракційної поверхні в OpticStudio, ми створили систему з декількома конфігураціями, у якій використовували тип дифракційної поверхні Binary 2 для опису додавання фаз у різних порядках. Фазовий профіль, що відповідає тій самій ідеальній біфокальній лінзі, як обговорювалося раніше, можна описати наступним рівнянням:

$$\phi(r) = \text{mod} \left(\frac{\pi P_{add} \cdot r^2}{\lambda_0}, 2\pi \right). \quad (3.5)$$

Модель містить п'ять конфігурацій, що відповідають нульовому та одиничному порядкам дифракції з використанням Binary 2 фазового представлення, а також нульовому та одиничному порядку, а також проміжний геометричний фокус рельєфної моделі UDS DLL. Фокальні площини нульового та одиничного порядків були визначені за допомогою оптимізації для

найменшої середньоквадратичної помилки хвильового фронту на основі моделі Binary 2, і ті самі позиції були підібрані для аналізу в новій моделі DLL UDS.

Результати FFT PSF у фокальних площинах чітко демонструють різницю між моделями розкладання порядку та зони. У той час як вбудована модель Binary 2 враховує лише вибраний порядок, представлення DLL UDS також враховує інші порядки поза фокусом, створюючи великий фон для PSF.

Ця поведінка візуалізується нижче на зображеннях у логарифмічному масштабі в точці фокусування першого порядку. Діаграма FSF PSF із хибним кольором у лівій частині відповідає моделі розкладання порядку, тоді як праворуч показує результати розкладання на зони. Поперечні перерізи тих самих результатів PSF у центральному рядку, тобто в позиції $Y=0$, показані на рис. (3.6, 3.7).

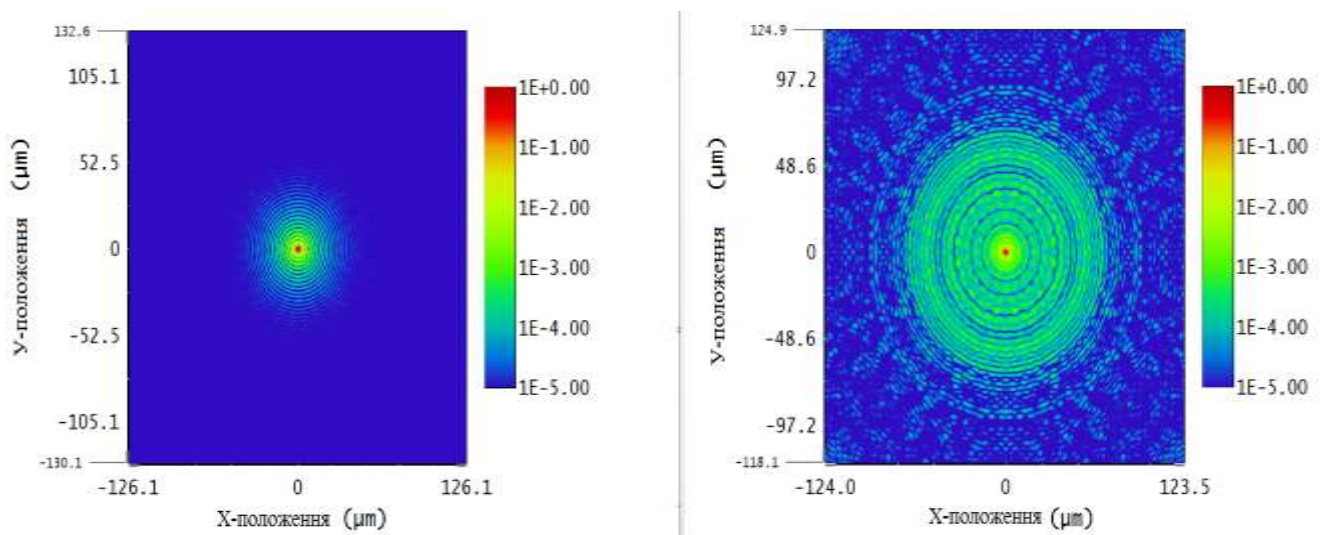


Рисунок 3.6 – Поперечні перерізи тих самих результатів PSF у центральному рядку

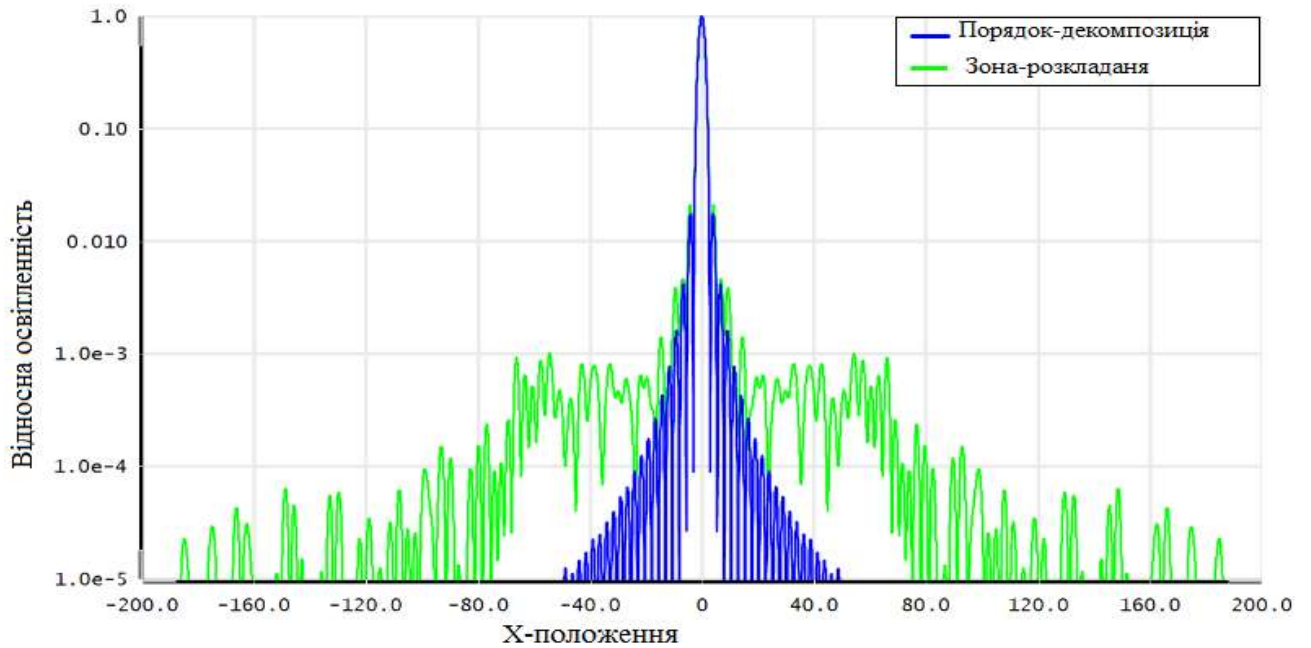


Рисунок 3.7 – Результати FFT MTF

Крім того, результати FFT MTF показують, що ефективність дифракції точно враховується в моделі зонного розкладання, але не у випадку розкладання порядку (рис. 3.8) [18].

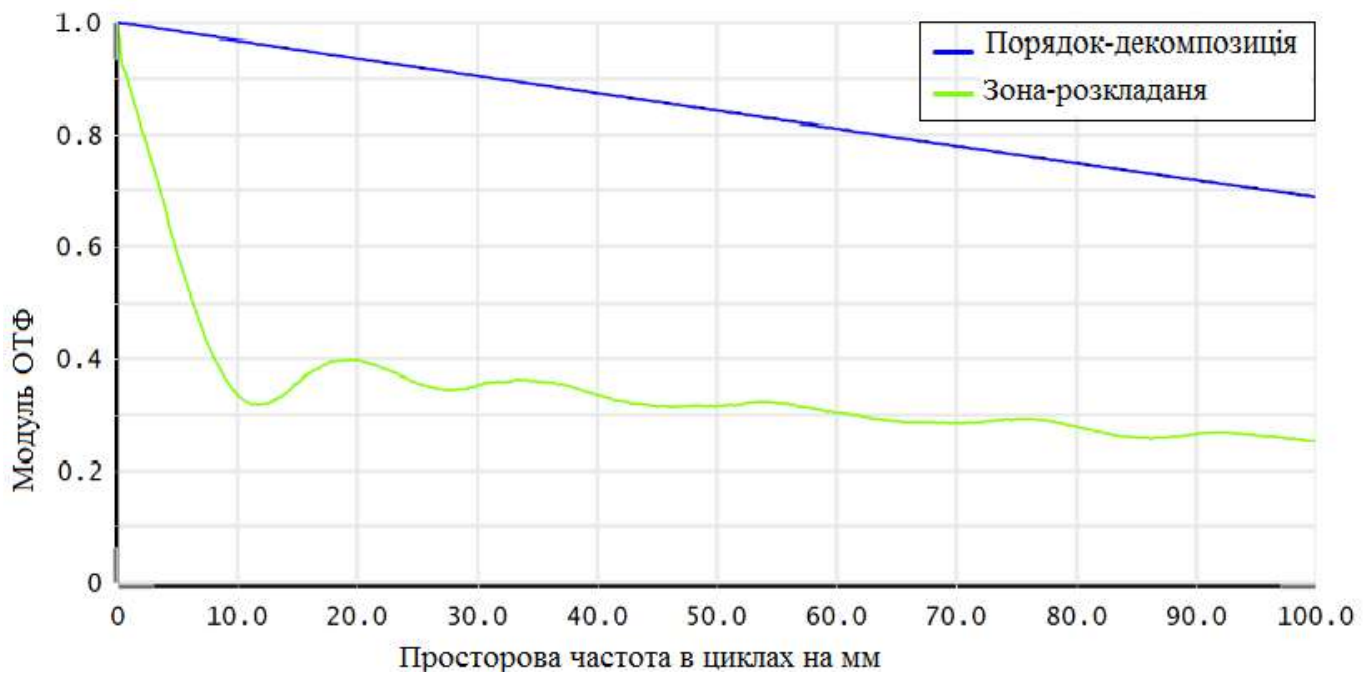


Рисунок 3.8 – Модель зонного розкладання

3.4 Поліхроматичні результати

Нарешті, щоб продемонструвати, що відстеження реальних шляхів променів у моделі зонного розкладання також враховує дисперсію довжини хвилі в лінзі, ми проаналізували продуктивність системи у видимому спектральному діапазоні. Щоб зберегти проектну довжину хвилі як еталонну при розширенні діапазону, ми використали лінії F', e і C', вибравши попередні налаштування F', e, C' (видимий). Графік FFT Through Focus MTF зображує, як фокальна площина першого порядку (лівий горб) зсувається від площини нульового порядку (горб справа) зі збільшенням довжини хвилі (рис. 3.9). У той же час на більших довжинах хвиль більше енергії дифрагує до нульового порядку і менше до першого порядку, як і очікувалося з теорії [19].

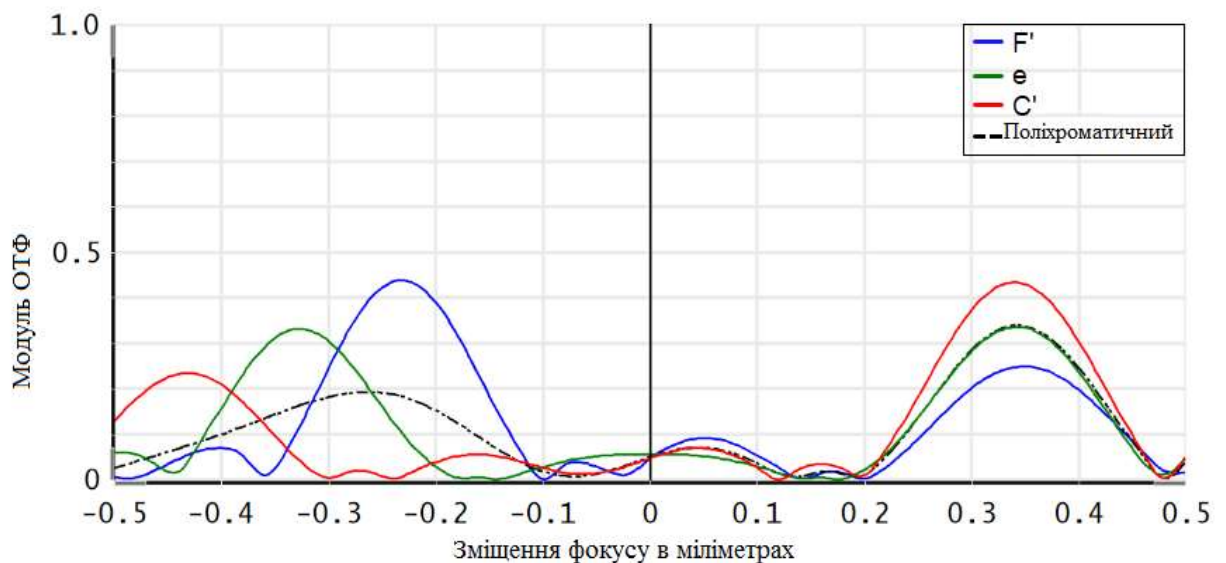


Рисунок 3.9 – Продуктивність системи у видимому спектральному діапазоні

ВИСНОВКИ

В результаті роботи, щоб забезпечити хорошу якість зображення в широкому діапазоні відстаней до об'єкта, кінцевою метою було відтворити можливість акомодатії оригінального кришталіка. Безпосередня імітація природних процесів людського ока за допомогою штучних елементів. Однак дифракційні ІОЛ можуть забезпечити готове рішення для кількох відстаней перегляду одночасно. У цій роботі показано, як реалізували реалістичну модель дифракційних лінз рельєфного типу на основі реальної форми поверхні за допомогою трасування променів разом із дифракційним аналізом, а також демонстрували переваги моделі для комплексної оцінки продуктивності системи.

Біфокальні ІОЛ працюють, використовуючи дифракційну природу світла. Нагадуємо, коли різні світлові хвилі поширюються та збігаються в одному місці, вони інтерферують. Ця інтерференція може бути деструктивною або конструктивною (або частковою зміною того чи іншого) і є функцією довжини оптичного шляху окремих світлових хвиль. Лінзи розроблені з основною оптичною силою та мають концентричні кільцеві зони принаймні на одній поверхні. Світло, що проходить через ці кільцеві зони, контролювано інтерферує з оптичними «кроками» між зонами.

Для конструкції ІОЛ висота та форма ступенів вибираються так, щоб створити два фокуси на сітківці ока: один для ближньої точки ока, а інший для об'єктів, розташованих далеко. В оці завжди присутні обидва вогнища. Коли об'єкт знаходиться поблизу глядача, одне зображення перебуває у фокусі, а інший фокус створює розфокусоване зображення на сітківці. Мозок вчиться ігнорувати розфокусоване зображення та зосереджуватися на зображенні у фокусі.

Також розглянули однокроковий аналіз дифракції від вихідної зіниці до площини зображення. Оскільки зміни фази через дифракційний елемент розраховуються на основі геометричної оптики, зонна декомпозиція є найбільш

актуальною, коли дифракційна поверхня розташована на вихідній зіниці або в одному з її сполучених положень (вхідна зіниця або межа діафрагми).

Щоб продемонструвати застосовність і переваги нової дифракційної поверхні DLL, ми реалізували модель ідеальної дифракційної лінзи, яка рівномірно розподіляє світло в нульовому та першому порядках дифракції на проектній довжині хвилі.

Щоб підтвердити модель ІОЛ, ми включили дифракційну UDS DLL у стандартну модель ока ISO 11979-2, яка розроблена для виробничого тестування оптичних властивостей офтальмологічних імплантатів. Модель ока містить рогівку практично без аберацій, після чого ІОЛ поміщають у рідке середовище між двома плоскими вікнами.

Задню фокусну відстань системи було оптимізовано для найменшої середньоквадратичної помилки хвильового фронту за допомогою інструменту швидкого фокусування, що призводить до розташування зображення на півдорозі між нульовою та першою фокальними точками. Це також виправдовує те, що крім трасування променів необхідний скалярний дифракційний аналіз для правильного опису поведінки лінзи в дальньому полі. Крім того, у цьому проміжному положенні карта хвильового фронту чітко показує різницю напівхвиль між сусідніми зонами, що добре узгоджується з теоретичними очікуваннями.

Щоб порівняти нову реалістичну модель DLL UDS із вбудованими моделями дифракційної поверхні в OpticStudio, ми створили систему з декількома конфігураціями, у якій використовували тип дифракційної поверхні Binary 2 для опису додавання фаз у різних порядках.

Щоб продемонструвати, що відстеження реальних шляхів променів у моделі зонного розкладання також враховує дисперсію довжини хвилі в лінзі, ми проаналізували продуктивність системи у видимому спектральному діапазоні.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Gnatenko, A. S., Machekhin, Y. P., Kurskoy, Y. S., Obozna, V. P., & Vasianovych, A. V. (2018). Ring fiber lasers for telecommunication systems. *Telecommunications and Radio Engineering*, 77(6), 541-548.
2. Afanasieva, I., Golian, N., Hnatenko, O., Daniil, Y., & Onyshchenko, K. (2019). Data exchange model in the internet of things concept. *Telecommunications and Radio Engineering*, 78(10), 869-878.
3. Guriev, I. V., Sukhoivanov, I. A., Gnatenko, A. S., & Lipkina, V. I. (2008). Multiple plane waves expansion method for dispersive media. *Telecommunications and Radio Engineering*, 67(9), 833-841.
4. Мачехін Ю.П., Гнатенко О.С., Курський Ю.С., Семенець В.В., Неофітний М.В. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційновиміррювальна техніка для задач військового призначення. Харків. 2019. - 156 с.
5. Hnatenko, O. S. (2021). Fiber Laser Based on Electronically Controlled Phase Plates. *Journal of Nano- & Electronic Physics*, 13(5).
6. Gnatenko, A. S., Machekhin, Y. P., & Natarova, Y. V. (2015). The control system of the pump diodes fiber ring femtosecond lasers. *Applied Radio Electronics: Sci. Journ*, 14(2), 185-188.
7. Hnatenko, O. S., Neofitnyi, M. V., Machekhin Yu, P., & Zarytskyi, V. I. (2019). Zhdanova Yu. 1, 55 mkm fiber laser with electronic controlled mode-locking. In *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL* (pp. 6-8).
8. Hnatenko, O. S., V. V. Semenets, and M. V. Neofitnyi. *The usage of lasers in military equipment. Part1*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020.
9. Hnatenko, O. S., and V. P. Obozna. "Calculation of the Stability of the Fiber Ring Laser with Liquid Crystal Polarization Controllers." (2018).
10. Gnatenko, A. S., & Machechin, Y. P. (2015). Vasko K.O Providing control of the polarization inside the resonator fiber ring laser. *Вісник Київського*

національного університету імені Тараса Шевченка. *Радіофізика та електроніка*. Київ, 20-23.

11. Гнатенко О. С., Жданова Ю. В. Моделювання лазерних прецизійних інформаційно-вимірювальних пристроїв. 10-та Всеукраїнська науковопрактичної конференції молодих учених і студентів, 16-17 травня 2019 р. м. Одеса, 2019. Одеса. С. 213–214.

12. Sivni, V. B., and O. S. Hnatenko. "Investigation of the Generation of Droplet Lasers." (2018).

13. Gnatenko, A. S., and K. A. Vasko. "Mode locking in a fiber femtosecond laser using liquid crystal cells." (2015).

14. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 3. Фемтосекундні лазери для інформаційно-вимірювальних технологій / О. С. Гнатенко ; Харків : Факт, 2023 - 130 с. ISBN 978-966-617-8072-88-9

15. Obozna, V.P. Formation of Laser Radiation Pulses for Encoding inFormation / V.P. Obozna, O.S. Hnatenko // Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції, м. Суми, 5-9 лютого 2018 р. / Відп. за вип. С.І. Проценко. – Суми: СумДУ, 2018. – С. 24.

16. Hnatenko O. S. Modeling the interaction of laser radiation with complex biological optical systems / O. S. Hnatenko, O. O. Kalna // Інформатика, математика, автоматика: матеріали науково-технічної конференції ІМА:2018, 5-9 лютого 2018 р. - Суми, 2018 - 201 с.

17. Hnatenko, Oleksandr S., Yuriy P. Machekhin, Victor Bilichenko, Valeriy Zarytskyi, Yaroslav Yaroslavskyy, Jacek Klimek, Kanat Mussabekov, Bakhyt Yeraliyeva, and Ainur Ormanbekova. "Fiber-optic system for control of the orientation of objects in space." In *Optical Fibers and Their Applications 2023*, vol. 12985, pp. 47-54. SPIE, 2023.

18. Natarova, Yu V., A. B. Galat, and A. S. Gnatenko. "Investigation of Photoelectric Converters Based on Different Semiconductor Materials." *Journal of Nano-and Electronic Physics* 10, no. 4 (2018).

19. Hnatenko, O. S., Yu P. Machekhin, M. V. Neofitnyi, and S. V. Gulak. "Design and study of a laser system for detecting optical devices." (2019).