Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Автоматизація процесу визначення оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна в середовищі MATLAB
(тема)

Виконав:
здобувач 3 року навчання,
групи АКТАКІТу-23-1

Роман БОНДАРЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Оксана СИЧОВА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Бондаренко Роман Олексійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"25" червня 2026 р.  Роман БОНДАРЕНКО

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп’ютерно-інтегрованих технологій та систем

Кафедра Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії.

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

_____
(підпис)

«_____»_____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Бондаренко Роману Олексійовичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу визначення оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна в середовищі MATLAB
затверджена наказом університету від 20 05 2026 р. № 411 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 25.06.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи Середовище виконання роботи MATLAB, показники заломлення серцевини та оболонки, діаметр повітряних отворів d, крок структури Λ, довжина хвилі λ, радіус вигину R, довжина волокна L, спектральна ширина Δλ та початкова тривалість імпульсу.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ.
4.2 Аналіз процесу визначення оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна.
4.3 Розроблення алгоритму та програми в MATLAB.
4.4 Автоматичне регулювання процесу витягування оптичного волокна
4.5 Дослідження впливу d/λ на параметри МОВ.
4.6 Охорона праці
4.7 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал представлено у форматі презентації в PowerPoint (* pdf) 10 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз процесу визначення оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна	15.05.26	Виконано
2	Розроблення алгоритму та програми в MATLAB	25.05.26	Виконано
3	Дослідження впливу d/λ на параметри МОВ.	06.06.26	Виконано
4	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	17.06.26	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18.06.26	Виконано
6	Подання роботи на рецензію	21.06.26	Виконано
7	Подання роботи на підпис зав. кафедри	23.06.26	Виконано
8	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	25.06.26	Виконано

Дата видачі завдання 27 04 2026 р.

Здобувач _____ Роман БОНДАРЕНКО
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Оксана СИЧОВА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 43 с., 4 табл., 18 рис., 2 дод., 19 джерел.

МІКРОСТРУКТУРОВАНЕ ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНЕ ВОЛОКНО, ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ, MATLAB, АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ.

Об’єкт розробки – мікроструктуроване оптичне волокно зі складною періодичною внутрішньою геометрією.

Предмет розробки – методи, алгоритми та програмні засоби автоматизованого визначення оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна.

Мета роботи – підвищення точності та швидкодії розрахунків оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна у середовищі MATLAB.

Проаналізовано будову та принцип роботи мікроструктурованих оптичних волокон, проведено аналіз основних оптико-геометричних параметрів МОВ та зроблено аналіз математичних моделей для розрахунку параметрів волокна. В результаті виконання роботи розроблено програму автоматизованого розрахунку основних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна. Проведено дослідження впливу параметра d/Λ на основні оптичні характеристики волокна та встановлено закономірності зміни ефективного показника заломлення, хроматичної дисперсії, втрат при вигині та розширення імпульсу.

Також, отримані результати роботи можно віднести до Цілі сталого розвитку 9 "Промисловість, інновації та інфраструктура", а саме п.9.6 "Забезпечити доступність Інтернету, особливо у сільській місцевості"

ABSTRACT

Explanatory note: 47 p., 4 tab., 18 fig., 3 app., 19 sources.

MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBER, PHOTONIC CRYSTAL FIBER, OPTICAL-GEOMETRIC PARAMETERS, MATLAB, AUTOMATION OF CALCULATIONS.

The object of development is a microstructured optical fiber with a complex periodic internal geometry.

The subject of development is methods, algorithms and software for automated determination of optical-geometric parameters of a microstructured optical fiber.

The purpose of the work is to increase the accuracy and speed of measurements of optical-geometric parameters of a microstructured optical fiber in the MATLAB environment.

The structure and principle of operation of microstructured optical fibers are analyzed, the main optical-geometric parameters of the MF are analyzed, and mathematical models for calculating fiber parameters are analyzed. As a result of the work, a program for automated calculation of the main parameters of a microstructured optical fiber was developed. The influence of the parameter d/Λ on the main optical characteristics of the fiber was studied and the patterns of changes in the effective refractive index, chromatic dispersion, bending losses and pulse broadening were established.

Also, the results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", namely p. 9.6 "Ensure Internet accessibility, especially in rural areas".

ЗМІСТ

Перелік скорочень 8
Вступ 9
1 Аналіз процесу визначення процесу визначення оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна 11
1.1 Аналіз будови та принципу роботи мікроструктурованих оптичних волокон 11
1.2 Аналіз основних оптико-геометричних параметрів МОВ 16
1.3 Аналіз математичних моделей для розрахунку параметрів волокна.. 23
2 Розроблення алгоритму та програми в MATLAB 27
2.1 Розроблення алгоритму автоматизованого розрахунку параметрів МОВ 27
2.2 Розроблення програми автоматизованого розрахунку параметрів МОВ в MATLAB 30
2.3 Автоматичне регулювання процесу витягування оптичного волокна.....35
3 Дослідження впливу d/λ на параметри МОВ 39
3.1 Дослідження впливу параметра d/Λ на характеристики МОВ 40
3.2 Охорона праці 47
Висновки 50
Перелік джерел посилання 51
Додаток А Код програми в MATLAB 54
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....58

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВВК – вуглекислотний вогнегасник;

ДСН – державна служба України з надзвичайних ситуацій;

МОВ – мікроструктуровані оптичні волокна;

ПК – персональний комп'ютер;

СК – система керування;

ФКВ – фотонно-кристалічні волокна;

ЧПК – числове програмне керування;

EMT – effective Medium Theory (теорія ефективного середовища);

FDTD – finite Difference Time Domain (метод скінченних різниць у часовій області);

FEM – finite Element Method (метод скінченних елементів);

IR – infrared (інфрачервоне випромінювання);

PBG – photonic Bandgap (фотонна заборонена зона).

ВСТУП

У сучасних телекомунікаційних, лазерних та сенсорних системах оптичні волокна відіграють надзвичайно важливу роль завдяки високій швидкості передачі даних, малим втратам сигналу та стійкості до електромагнітних завад. Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку волоконно-оптичних технологій є використання мікроструктурованих оптичних волокон (МОВ), також відомих як фотонно-кристалічні волокна. На відміну від класичних оптичних волокон, у МОВ напрямлення світла визначається не лише різницею показників заломлення між серцевиною та оболонкою, а й спеціально сформованою системою повітряних отворів у структурі оболонки.

Завдяки своїй складній геометрії мікроструктуровані оптичні волокна дозволяють ефективно керувати поширенням світла, дисперсійними характеристиками, нелінійними ефектами та втратами при вигині. Це робить їх перспективними для використання у високошвидкісних системах зв’язку, волоконних лазерах, оптичних сенсорах, системах спектрального аналізу, медичних технологіях та квантовій оптиці.

Основними параметрами, що визначають характеристики мікроструктурованого оптичного волокна, є діаметр повітряних отворів, крок їх розташування, співвідношення d/Λ, ефективний показник заломлення, хроматична дисперсія та втрати оптичного сигналу. Визначення цих параметрів є складною задачею, оскільки воно потребує великої кількості математичних обчислень і використання чисельних методів розв’язання рівнянь електродинаміки. Ручне виконання таких розрахунків потребує значного часу та може супроводжуватись похибками, що знижує ефективність процесу проектування волокон.

Мікроструктуровані оптичні волокна мають складну внутрішню геометрію. Точне визначення їх оптико-геометричних параметрів (діаметра

серцевини, періоду структури, діаметра повітряних отворів тощо) є критично важливим для забезпечення заданих характеристик передачі сигналу і мінімізації втрат. Традиційні методи аналізу таких параметрів часто є трудомісткими, суб'єктивними та потребують значних часових витрат. У зв'язку з цим зростає потреба в автоматизації визначення параметрів мікроструктурованих волокон із використанням сучасних програмних засобів, зокрема середовища MATLAB.

Мета роботи – підвищення точності та швидкодії розрахунків оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна у середовищі MATLAB.

Об'єкт розробки – мікроструктуроване оптичне волокно зі складною періодичною внутрішньою геометрією.

Предмет розробки – методи, алгоритми та програмні засоби автоматизованого визначення оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– провести аналіз будови та принципу роботи мікроструктурованих оптичних волокон;

– проаналізувати основні оптико-геометричні параметри МОВ: діаметр отворів d; крок розташування Λ; співвідношення d/Λ; ефективний показник заломлення; хроматична дисперсія; втрати оптичного сигналу;

– розглянути математичні моделі для розрахунку параметрів волокна;

– розробити алгоритм автоматизованого розрахунку параметрів МОВ;

– реалізувати програму в MATLAB для: введення параметрів, автоматичного обчислення, побудови графіків, аналізу результатів;

– провести дослідження впливу параметра d/Λ на: ефективний показник заломлення; дисперсію; втрати; розширення імпульсу.

Дипломна робота виконана згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], та керуючись навчальним посібником з дипломного проектування [2] і відповідними методичними вказівками [3].

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МІКРОСТРУКТУРОВАНОГО ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

1.1 Аналіз будови та принципу роботи мікроструктурованих оптичних волокон

Фотонні кристалічні волокна (також звані дірковими волокнами, волокнами з дірками, мікроструктурованим волокном або мікроструктурованими волокнами) це спеціальні волокна, що містять крихітні повітряні отвори, які дозволяють формувати спрямовані хвилі з фізичними механізмами, відмінними від механізмів звичайних волокон.

Розробка фотонно-кристалічних волокон, проведені науковою групою Філіпа Сент-Дж. Рассела. У 1991 році з'явилася ідея, що світло можна утримувати всередині порожнистої серцевини волокна шляхом створення періодичної, співрозмірної з довжиною хвилі, ґратки мікроскопічних отворів у склі оболонки – так званого «фотонного кристала». Щоб зрозуміти, як це працює, слід врахувати, що всі періодичні структури з масштабом довжини хвилі мають діапазони кутів і довжин хвиль («заборонені зони» або stop bands), у яких падаюче світло сильно відбивається. Саме це явище зумовлює кольори крил метеликів, пір'я павичів і голограм, наприклад, на кредитних картках. У матеріалах із фотонною забороненою зоною (PBG), однак, ці діапазони розширюються настільки, що блокують поширення світла в усіх напрямках, що призводить до пригнічення всіх оптичних коливань у відповідному діапазоні довжин хвиль. За відповідного проектування перфорована фотонно-кристалічна оболонка, що простягається вздовж усієї довжини волокна, може запобігати виходу світла з порожнистої серцевини. Таким чином, стає можливим відійти від обмежень повного внутрішнього відбиття та утримувати світло в порожнистій серцевині, оточеній склом.

Фотонно-кристалічне волокно містить щільно розташовані мікроскопічні повітряні отвори, які зазвичай проходять паралельно осі волокна. Такі отвори можуть бути отримані шляхом використання преформи з (більшими) отворами, виготовленої, наприклад, методом складання капілярних і/або суцільних трубок (метод складених трубок) з подальшим розміщенням їх у більшу трубку. Зазвичай цю преформу спочатку витягують у стрижень (cane) діаметром, наприклад, близько 1 мм, а потім – у волокно з кінцевим діаметром, наприклад, 125 мкм,

При спробах створити перші МОВ виявлено, що кремнеземні капіляри можна укладати в структуру, сплавляти разом і успішно витягувати у фотонно-кристалічне волокно. Пакет скляних трубок і стрижнів(рис. 1.1, а) формується як макроскопічна «преформа» з необхідною фотонно-кристалічною структурою. Для розм'якшення кремнеземного скла піч (рис. 1.1, б) працює при температурі 1800–2000 °C. Далі її сплавляють і витягують у волокно (с) у два етапи за допомогою стандартної волокновитяжної установки. Ця процедура складання і витягування (stack-and-draw) виявилася надзвичайно універсальною, дозволяючи формувати складні ґратки з окремих елементів потрібного розміру та форми. Легко можна комбінувати суцільні, порожнисті або леговані ділянки скла. Успіх цього методу значною мірою пояснюється механічною стабільністю структури – сили поверхневого натягу мають тенденцію врівноважуватися, що дозволяє формувати високорегулярні ґратки отворів у процесі витягування. Досягнуто загальних коефіцієнтів зменшення розмірів до ≈50 000 разів, а також продемонстровано безперервні отвори діаметром до 25 нм.

Ще однією перспективною, хоча й не повністю доведеною до досконалості, технологією є екструзія, при якій розплавлене скло продавлюється через матрицю з відповідним шаблоном отворів. Екструзія дозволяє безпосередньо витягувати волокно з масивного скла, причому можна створювати майже будь-які структури (кристалічні або аморфні). Вона придатна для багатьох матеріалів, включаючи халькогенідні скла, полімери та

складні скляні композиції. Особливо м’які скло та полімери (пластмаси) також дозволяють виготовляти преформи для фотонно-кристалічних волокон методом екструзії. Існує велика різноманітність конфігурацій розташування отворів, що призводить до отримання ФКВ з дуже різними властивостями. Усі такі ФКВ (фотонні кристалічні волокна**)** можна розглядати як спеціалізовані волокна.

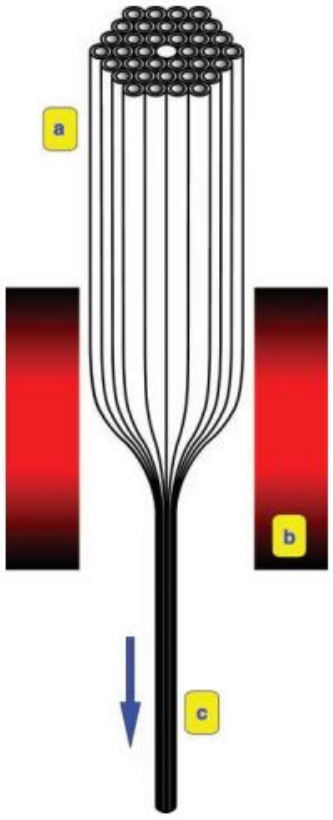


Рисунок 1.1 – Технологія виготовлення МОВ

Більшість фотонно-кристалічних волокон (рис. 1.2) виготовляють із чистого плавленого кварцу (кварцові волокна), що є сумісним із вищезгаданими технологіями виготовлення. Однак були продемонстровані різні ФКВ з інших матеріалів, зокрема зі склоподібних матеріалів із важкими металами та з полімерів, які іноді використовуються навіть для терагерцового випромінювання. Цікавим методом також є виготовлення преформ ФКВ із м’якого скла за допомогою 3D-друку.

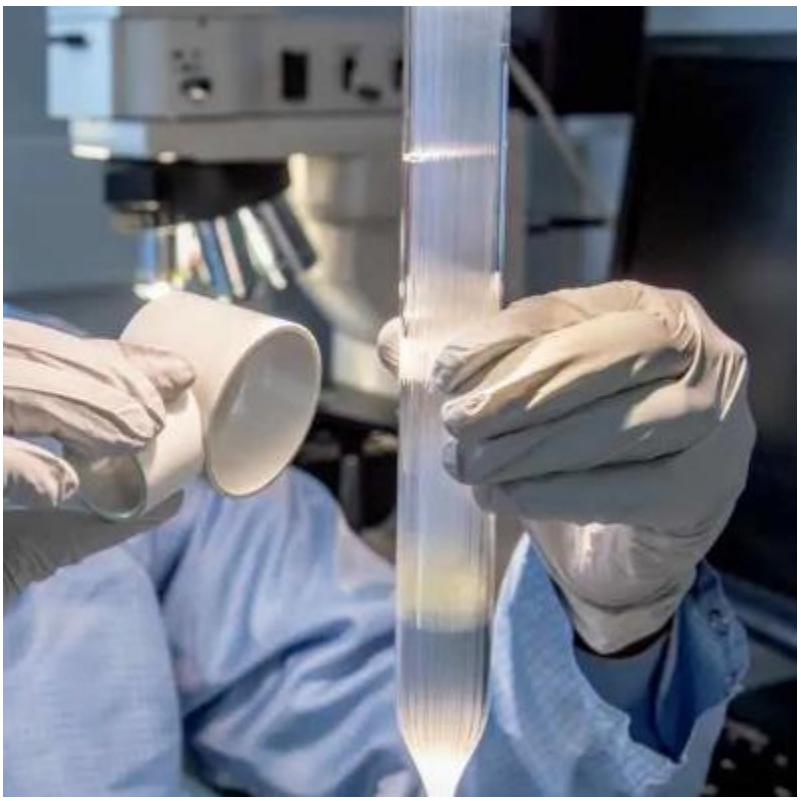


Рисунок 1.2 – Заготовки для МОВ

Залежно від конструкції, можна отримати суттєво різні фізичні механізми, що забезпечують напрямок світла.

Трикутні візерунки отворів – найпростіший (і найчастіше використовуваний) тип фотонно-кристалічного волокна має трикутний візерунок з повітряних отворів, один з яких відсутній, тобто із суцільним осердям, оточеним масивом повітряних отворів. Спрямувальні властивості цього типу ФКВ можна приблизно зрозуміти за допомогою моделі ефективного показника заломлення: область з відсутнім отвором має вищий ефективний показник заломлення, подібний до осердя волокна у звичайних волокнах. Цей принцип спрямованості може працювати в дуже широкому діапазоні довжин хвиль; навіть одномодове направлення може бути отримане в дуже широкій спектральній області (нескінченно одномодові волокна).

Існують також так звані фотонні волокна з забороненою зоною (PBG-волокна) із зовсім іншим механізмом наведення, заснованим на фотонній забороненій зоні області оболонки, яка розглядається як

двовимірний фотонний кристал. На основі цього механізму можна навіть отримати наведення в порожнистому осерді (тобто в області з низьким показником перелому) (рис. 1.2), так що більша частина енергії поширюється в центральному отворі (волокна з порожнистим осердям). Такі повітряно-направляючі волокна з порожнистим осердям (рис. 1.3) фотонного кристала (або волокна з забороненою зоною з повітряним осердям) можуть мати дуже низьку нелінійність та високий поріг пошкодження.

Фотонні волокна із забороненою зоною зазвичай проводять світло лише у відносно вузькій області довжин хвиль шириною, наприклад, 100–200 нм, і їх можна використовувати, наприклад, для стиснення імпульсів з високою оптичною інтенсивністю, оскільки більша частина потужності поширюється в порожнистому осерді.

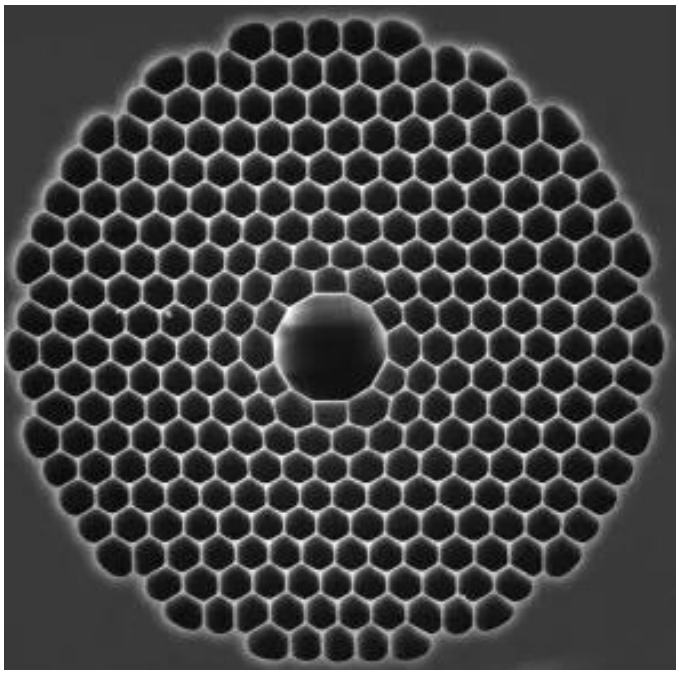


Рисунок 1.3 – Мікроскопічне зображення кінця волокна з порожнистою серцевиною

Перша переконлива структура фотонно-кристалічного волокна була отримана на волокно-витяжній установці в листопаді 1995 року. Вона мала гексагональну щільно упаковану решітку малих повітряних каналів і була

позбавлена грубих дефектів. Це був фотонний аналог чистого напівпровідникового кристала без домішок і дефектів, який потребує контрольованого введення домішок для практичного використання. Функціональні дефекти можна точно формувати під час процесу складання, що дозволяло виготовляти широкий спектр різних ФКВ.

МОВ дуже приваблива для широкого кола застосувань. Ось деякі приклади:

– волоконні лазери та підсилювачі, включаючи потужні пристрої, волоконні лазери з синхронізацією мод тощо;

– нелінійні пристрої, наприклад, для генерації суперконтинууму (частотні гребінці), раманівського перетворення, параметричного посилення, або імпульсного стиснення;

– телекомунікаційні компоненти, наприклад, для контролю дисперсії, фільтрації або комутації;

– волоконно-оптичні датчики різних типів;

– квантова оптика, наприклад, генерація корельованих пар фотонів, електромагнітно-індукована прозорість або керування холодними атомами.

1.2 Аналіз основних оптико-геометричних параметрів МОВ

Мікроструктуровані оптичні волокна (МОВ) – це тип оптичних волокон, у яких направлення світла забезпечується не лише різницею показників заломлення, а й геометрією повітряних отворів у оболонці. Їх характеристики визначаються саме оптико-геометричними параметрами, усього основних оптико-геометричних параметрів 6 штук.

Діаметр отворів d – це діаметр повітряних капілярів (рис. 1.4) у оболонці. Він визначає «силу» відбиття світла від оболонки. У МОВ оболонка не є суцільною скляною структурою – вона містить регулярні або квазірегулярні повітряні отвори, які змінюють ефективні оптичні характеристики матеріалу.

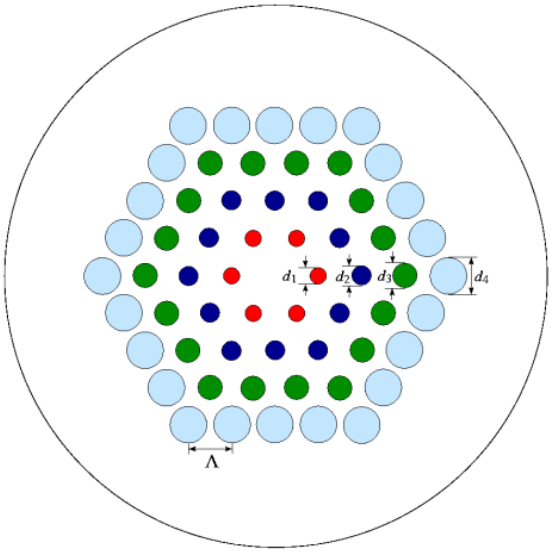


Рисунок 1.4 – Показники оптико-геометричних параметрів d та Λ

Чим більший *d*, тим сильніше світло локалізується в серцевині. Діаметр повітряних отворів є одним із ключових параметрів, що впливає контраст показників заломлення між серцевиною та оболонкою, ступінь локалізації світла, багатомодовість або одномодовість волокна.

Зі збільшенням оптико-геометричного параметра *d*:

– зменшується ефективний показник заломлення оболонки;

– покращується confinement (утримання світла в серцевині);

– можливий перехід до одномодового режиму.

Показник *d* також дуже сильно впливає на ефективний показник заломлення, тобто у класичному оптичному волокні оболонка має сталий показник заломлення (наприклад, ~1,45 для кремнезему). У МОВ ситуація інша: скло ($n \approx 1{,}45$), повітря ($n \approx 1{,}0$). Зі збільшенням *d* зростає частка повітря в оболонці, тож це призводить до зменшення середнього (ефективного) показника заломлення оболонки та посилення оптичного контрасту між серцевиною і оболонкою.

Зміна діаметра отворів також впливають на утримання світла. Наприклад збільшення діаметра отворів призводить до:

– сильнішого хвилевідного ефекту, це коли світло краще утримується в серцевині;

– збільшення числової апертури, це коли волокно краще захоплює світло;

– можливого переходу до одномодовості, це коли при великому d світловий потік стає більш обмеженим.

Діаметр отворів впливає не лише на утримання світла, але й на дисперсійні властивості. Тобто змінюється хвилевидна складова дисперсії, можна зміщувати нульову дисперсію в потрібний спектральний діапазон та можливе формування аномальної дисперсії. Це особливо важливо в лазерних системах і телекомунікаціях.

Також важливо зазначити, що діаметр отворів впливає втрати та можливий вигин. Тобто при збільшенні d зменшуються втрати оптичного сигналу (в межах оптимального діапазону), також підвищується механічна чутливість структури та при надто великому d можливе зростання розсіювання та технологічних дефектів.

Крок розташування отворів Λ (лямбда) – це ключовий геометричний параметр мікроструктурованого оптичного волокна, який визначає просторову періодичність повітряних отворів у поперечному перерізі оболонки, тобто Λ – це відстань між центрами сусідніх повітряних отворів у структурі волокна. На рисунку 1.4 наглядно показані параметри d та Λ.

Параметр Λ задає масштаб мікроструктури волокна, “щільність” розташування повітряних отворів та характер фотонного обмеження світла. Чим менший Λ – тим більш щільно розташовані отвори і тим сильніше виражена мікроструктурна природа волокна.

У МОВ світло не лише заломлюється на межі “серцевина–оболонка”, як у звичайному волокні, а ще й взаємодіє з періодичною структурою отворів. Λ визначає: розмір ефективної фотонної ґратки періодичність зміни показника заломлення масштаб хвилевідних ефектів.

Зміна Λ може суттєво впливати на різні оптичні властивості. Наприклад коли значення Λ велике то збільшується розмір моди, послабшується утримання світла та зменшується взаємодія з повітряними отворами. Коли

значення лямбди мале то посилюється обмеження світла в серцевині, з`являэться можливість досягнення одномодовості, навіть при великому діаметрі серцевини. Також Λ визначає характерну масштабну довжину хвилі, при якій проявляються фотонно-кристалічні ефекти. Якщо λ (довжина хвилі світла) < Λ, то структура відображається як неоднорідне середовище. Якщо λ ≈ Λ, то проявляються сильні хвилевидні та дисперсійні ефекти. Якщо λ > Λ, то структура поводиться як ефективне середовище.

Треба зазначити, що Λ напряму впливає на хвилевидну складову дисперсії, тобто чим менший Λ тим сильніша хвилевидна дисперсія, чим більший Λ тим більше домінує матеріальна дисперсія. Саме через Λ можна: зміщувати нульову дисперсію створювати області аномальної дисперсії, керувати формою імпульсів у волокнах.

Дуже важливо, що крок розташування отворів також впливає на механічну оптичну стабільність. Наприклад, якщо показник Λ малий то буде сильніше утримання світла, менші витрати при вигині але й вища технологічна складність виготовлення, а якщо показник Λ великий то буде набагато легше виготовлення волокна алей більші втрати оптичного сигналу та слабше обмеження моди.

За допомоги регулювання цього параметру відкриваються можливості більш гнучкого проектування мікроструктурованих оптичних волокон, а саме:

- проектувати одномодові фотонні волокна;
- контролювати дисперсію для лазерних систем;
- оптимізувати передачу ультракоротких імпульсів;
- створювати волокна з наднизькими втратами;
- адаптувати волокно під різні довжини хвиль (IR, видимий діапазон).

Параметр d/Λ визначає геометричну “щільність” повітряної структури в оболонці та безпосередньо впливає на режим поширення світла, дисперсію та втрати. Де d – діаметр повітряних отворів, а Λ – крок їх розташування.

Співвідношення d/Λ показує, яку частину простору між отворами займає повітря. Якщо мале d/Λ то переважає скло, якщо велике d/Λ то переважає

повітря. МОВ працює не лише за рахунок повного внутрішнього відбиття, як класичне волокно, а також завдяки фотонно-кристалічному ефекту, тож d/Λ визначає:

– контраст показника заломлення оболонки;

– силу фотонного обмеження світла;

– розмір моди (mode field diameter);

– умови одномодовості.

Основні значення співвідношення d та Λ, якщо d/Λ < 0,2–0,3 то волокно має слабку структуру повітряних отворів, поведінка близька до звичайного оптичного волокна, слабкий фотонний ефект та можливі значні модові втрати. Якщо d/Λ ≈ 0,3–0,4 то починає проявлятись фотонно-кристалічне обмеження, можна досягати одномодовості. Якщо d/Λ > 0,4 то появляється сильний фотонно-кристалічний ефект, потужне утримання світла в серцевині та є можливість “endlessly single-mode” режиму (одномодовість у широкому спектрі довжин хвиль). Приблизно при: $\frac{d}{\Lambda} \approx 0{,}4$ відбувається перехід від багатомодової поведінки до стабільної одномодової роботи. Співвідношення d/Λ сильно впливає на хвилевідну дисперсію, тож якщо значення d/Λ мале то керованість дисперсії слабка, якщо значення d/Λ велике то хвилевідна складова дисперсії сильна.

Вплив на витрати при вигині у параметра співвідношення d/Λ великий. Наприклад через великий показник цього параметра відбувається сильніше утримування світла, менші втрати оптичного сигналу, висока стабільність сигналу, а при малому показнику навпаки.

Ефективний показник заломлення (n_{eff}) у мікроструктурованих оптичних волокнах – це ключова характеристика оптичної моди, яка описує, з якою швидкістю світлова хвиля поширюється вздовж волокна з урахуванням його складної мікроструктури. n_{eff} є параметром моди, а не середовища. Ефективний показник заломлення визначається як умовний показник заломлення, результат взаємодії світла з геометрією волокна та характеристика фазової швидкості поширення хвилі. Формально він

пов’язаний із сталою поширення β:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} = \frac{c\beta}{\omega}, \quad (1.1)$$

де β – стала поширення моди;

k_0 – хвильове число у вакуумі;

ω – кутова частота.

У мікроструктурованих волокнах межа значення n_{eff} завжди виконується як: $n_{clad} < n_{eff} < n_{core}$, тобто обмежений ефективним показником оболонки та показником серцевини, це гарантує утримання світла всередині серцевини. У МОВ оболонка не є однорідною, тому n_{eff} залежить від:

– діаметра отворів (d);

– кроку структури (Λ);

– співвідношення d/Λ;

– довжини хвилі λ;

– геометрії серцевини.

Якщо збільшується d або d/Λ то збільшується повітря в структурі, зменшується n_{eff} оболонки та відбувається сильніше обмеження світла. Якщо зменшується Λ то щільніша структура, сильніша взаємодія моди з отворами та виходить зміна дисперсії n_{eff}. Ефективний показник заломлення також впливає на швидкість поширення світла:

$$v_{\text{phase}} = \frac{c}{\text{n}_{\text{eff}}}. \quad (1.2)$$

За цією формулою стає зрозуміло, що чим більший n_{eff} тим повільніше поширення світла, чим менший n_{eff} тим швидше поширення світла. Також n_{eff} залежить від довжини хвилі λ, тобто короткі хвилі інше значення n_{eff}, довгі хвилі також інше значення n_{eff}. Це називається хвильовою дисперсією, у МОВ вона дуже сильна.

Використовують ефективний показник заломлення щоб проєктувати одномодові волокна, керувати дисперсією, створювати фотонно-кристалічні фільтри, оптимізувати передачу лазерних імпульсів, зменшувати втрати в телекомунікаціях.

Хроматична дисперсія в мікроструктурованих оптичних волокнах – це явище, при якому різні довжини хвиль світла поширюються в оптичному волокні з різною швидкістю, що призводить до розширення світлових імпульсів у часі.

Хроматична дисперсія складається з двох основних частин, перша – це матеріальна дисперсія вона виникає через залежність показника заломлення скла від довжини хвилі. Друга – це хвилевідна дисперсія вона виникає через геометрію та структуру волокна, у МОВ хвилевідна дисперсія може бути сильнішою за матеріальну.

На відміну від стандартних волокон, у МОВ можна інженерно керувати дисперсією, змінюючи діаметр отворів d, крок Λ, співвідношення d/Λ та форму серцевини. Існують декілька видів висперсій залежно від їх числового параметру, так якщо дисперсія $D < 0$, то вона нормальна, тобто короткі хвилі йдуть повільніше, імпульси розтягуються, вона характерна для більшості стандартних волокон. Якщо дисперсія $D > 0$, то вона аномальна, тобто довгі хвилі можуть поширюватися швидше, можливе формування солітонів. Якщо дисперсія $D=0$, то вона нульова, це означає, що імпульс не розтягується та всі довжини хвиль рухаються однаково швидко, це критично для високошвидкісних ліній зв’язку, лазерних імпульсів, оптичних підсилювачів

Контроль хроматичної дисперсії дозволяє передавати сигнали на великі відстані без спотворень, формувати ультракороткі лазерні імпульси, створювати широкий спектр світла, оптимізувати волоконні лазери та керувати нелінійними ефектами.

Втрати оптичного сигналу – це втрати оптичної потужності, які виникають при механічному згинанні волокна, коли частина світлової моди виходить за межі серцевини та випромінюється в оболонку або навколишнє

середовище. У МОВ ці втрати мають особливу природу, оскільки світло утримується не лише повним внутрішнім відбиттям, а й фотонно-кристалічною структурою оболонки.

Причини втрат при згинанні різні, першочергово фізично, коли волокно згинається то змінюється геометрія хвилеводу, порушується симетрія моди, перетікання енергії в оболонкові моди, порушення фотонно-кристалічного обмеження. Також втрати залежать від радіуса вигину R, якщо радіус великий, то втрати менші, якщо радіус малий то відбувається різке зростання втрат. Також чим більший *d* тим сильніше утримання світла тому і менші витрати, але можливі технологічні обеження. Чим менший крок Λ тим щільніша структура та краща стабільність, чим більший навпаки. Якщо $d/\Lambda > 0,4$ будуть низькі втрати оптичного сигналу, якщо $d/\Lambda < 0,3$ буде висока чутливість до згинання.

Існує мінімальний радіус R crit, при якому втрати різко зростають, тож якщо $R < R_{crit}$, то починаються різкі втрати, мода стає нестабільною, можливий вихід світла з волокна.

1.3 Аналіз математичних моделей для розрахунку параметрів волокна.

Для аналізу та проектування оптичних волокон, зокрема мікроструктурованих оптичних волокон, використовуються різноманітні математичні моделі. Вони дозволяють визначити основні характеристики волокна, такі як ефективний показник заломлення, модова структура, хроматична дисперсія та втрати.

Через складну геометрію МОВ аналітичні розв’язки є обмеженими, тому на практиці широко застосовуються чисельні методи, засновані на розв’язанні рівнянь Максвелла.

Методи розрахунку, наприклад модель ефективного середовища (Effective Medium Theory, EMT), де мікроструктурована оболонка замінюється однорідним середовищем:

$$n_{clad}^{eff} = f \cdot n_{air} + (1 + f) \cdot n_{glass}, \quad (1.3)$$

де f – частка повітря (визначається через d/Λ).

Цей метод використовується для оцінки ефективного показника заломлення та швидких інженерних розрахунків.

Скалярна хвильова модель описує поширення світла через хвильове рівняння:

$$\nabla^2 E + k^2 n^2(x, y) E = 0. \quad (1.4)$$

Дає розподіл поля та приблизні моди.

Метод скінченних елементів (FEM) – це чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь, який широко застосовується для аналізу електромагнітних полів у складних структурах, зокрема в мікроструктурованих оптичних волокнах.

FEM базується на розв'язанні повних рівнянь Максвелла. Для гармонічних полів використовується рівняння:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r^{-1} \nabla \cdot H) = k_0^2 n_{eff}^2 H, \quad (1.5)$$

де H – магнітне поле;

ϵ_r – діелектрична проникність;

n_{eff} – шуканий ефективний показник заломлення.

При цьому методі геометрія волокна розбивається на малі елементи: трикутники (2D), тетраедри (3D). Чим дрібніша сітка – тим вища точність.

Метод FEM ідеально підходить для МОВ, оскільки:

– структура має складну геометрію (повітряні отвори;

– великий контраст показників заломлення;

– необхідна висока точність.

Переваги FEM такі він має дуже високу точність, підходить для будь-

якої геометрії, враховує векторну природу світла, дозволяє аналізувати складні ефекти. Недоліки FEM такі: велика обчислювальна складність, потребує потужного комп'ютера, складність реалізації, залежність від якості сітки.

Метод скінченних різниць у часовій області (Finite Difference Time Domain – FDTD) – це чисельний метод, який використовується для моделювання поширення електромагнітних хвиль у часі. На відміну від FEM, FDTD працює у часовій області, що дозволяє аналізувати імпульси та нелінійні ефекти. Метод базується на диференціальній формі рівнянь Максвелла:

$$\nabla \cdot E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \tag{1.6}$$

$$\nabla \cdot H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}, \tag{1.7}$$

де E – електричне поле;

H – магнітне поле.

Ці рівняння дискретизуються за простором і часом. Основою методу є Yee-сітка тобто компоненти E і H розміщені зі зміщенням у просторі. Похідні замінюються скінченними різницями наприклад:

$$\frac{\partial E}{\partial t} \approx \frac{E^{n+1} - E^{n}}{\Delta t}. \tag{1.8}$$

В результаті отримуємо рекурентні формули спочатку обчислюється H, потім E і так далі у часі. Для коректної роботи необхідно виконувати:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c\sqrt{D}}, \tag{1.9}$$

де Δx – крок сітки;

D – розмірність задачі.

Якщо умова не виконується розрахунок стає нестабільним.

Застосування FDTD до МОВ дозволяє моделювати поширення імпульсів у волокні, досліджувати нелінійні ефекти, аналізувати втрати, вивчати дисперсію, досліджувати фотонні заборонені зони.

Переваги FDTD такі: універсальність, моделює реальний час, підходить для нелінійної оптики, не потребує апріорних припущень про моди. Недоліки FDTD: дуже великі обчислювальні витрати, потребує багато пам’яті, складний для 3D задач, висока чутливість до кроку сітки.

2 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ В MATLAB

2.1 Розроблення алгоритму автоматизованого розрахунку параметрів МОВ

Метою розроблення алгоритму є автоматизація процесу розрахунку основних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна, що дозволяє зменшити час аналізу та підвищити точність отриманих результатів.

Алгоритм представляє функції програми, що реалізовані: введення геометричних параметрів волокна, побудову математичної моделі, розрахунок ефективного показника заломлення, визначення хроматичної дисперсії, оцінку втрат при вигині, розрахунок розширення імпульсу, формування результатів у вигляді графіків.

Розроблено алгоритм автоматизованого розрахунку, який показує роботу програми (рис. 2.1).

Алгоритм працює наступним чином. Перший етап – введення параметрів мікроструктурованого оптичного волокна: діаметр повітряних отворів, крок розташування отворів, співвідношення d/Λ, довжину хвилі, показник заломлення скла, радіус вигину волокна, показник заломлення серцевини, показник заломлення оболонки, довжина волокна. Користувач вводить всі необхідні геометричні параметри МОВ.

Другий етап – обчислення ефективного показника заломлення, використовується рівняння:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}, \tag{2.1}$$

де β – стала поширення;

k_0 – хвильове число у вакуумі.

Третій етап – розрахунок хроматичної дисперсії, хроматична дисперсія визначається за формулою

$$D = -\frac{\lambda}{c}\frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2}. \quad (2.2)$$



Рисунок 2.1 – Алгоритм автоматизованого розрахунку параметрів мікроструктурованого оптичного волокна

Четвертий етап – розрахунок втрат оптичного сигналу. Втрати на вигині можуть бути оцінені за аналітичною формулою

$$a = K_1 \exp\left(-\frac{2R}{a}\frac{W_{eff}^3}{V_{eff}^2 \Delta_{eff}}\right), \quad (2.3)$$

де R – радіус вигину;

a – радіус серцевини;

V_{eff} – ефективна нормована частота;

W_{eff} – параметр структури модового поля;

Δ_{eff} – відносна різниця показників заломлення;

K_1 – коефіцієнт, що залежить від довжини хвилі.

Відносна різниця показників заломлення між серцевиною та ефективною оболонкою

$$\Delta_{eff} = \frac{n_{cort}^2 - n_{eff}^2}{2n_{core}^2}, \quad (2.4)$$

де n_{core} – показник заломлення серцевини;

n_{eff} – ефективний показник заломлення оболонки.

П'ятий етап – розрахунок розширення імпульсу, який визначається за формулою:

$$\Delta t = D \cdot L \cdot \Delta\lambda, \quad (2.5)$$

де Δt – розширення імпульсу;

D – коефіцієнт хроматичної дисперсії;

L – довжина волокна;

Δλ – спектральна ширина джерела.

Шостий етап – програма формує графіки відношення d/Λ від

ефективного показника заломлення, хроматичної дисперсії, втрат при вигині, розширення імпульсу та інформацію про обчислення ефективного показника заломлення, хроматичної дисперсії, втрат при вигині, розширення імпульсу.

Сьомий етап – на екран виводяться графіки залежності d/Λ від ефективного показника заломлення, хроматичної дисперсії, втрат при вигині, розширення імпульсу та інформацію про обчислення ефективного показника заломлення, хроматичної дисперсії, втрат при вигині, розширення імпульсу.

2.2 Розроблення програми автоматизованого розрахунку параметрів МОВ в MATLAB

Мікроструктуровані оптичні волокна (МОВ) є сучасним типом оптичних волокон, у яких характеристики передачі світла визначаються не лише матеріалом, а й складною геометрією повітряних отворів у оболонці волокна. Необхідно визначати: основні параметри волокна ефективний показник заломлення, хроматичну дисперсію, втрати оптичного сигналу, розширення імпульсу. Ручний розрахунок таких параметрів є дуже складним через велику кількість математичних обчислень та необхідність чисельного моделювання. Тому створення автоматизованої програми дозволяє значно скоротити час розрахунків, швидко аналізувати вплив параметрів d, Λ, n_{core}, n_{clad}, R, будувати графіки залежностей, проводити оптимізацію конструкції волокна.

Програма автоматизованого розрахунку параметрів МОВ базується на платформі MATLAB. MATLAB є одним із найпоширеніших програмних середовищ для наукових і технічних розрахунків. MATLAB може виконувати математичні функції, він зручний в реалізації чисельних методів, може створювати графікі та простий у автоматизації.

Для роботи програми та виконання алгоритму написано код (рис. 2.2).

Код чисельно обчислює ефективний показник заломлення через FEM, знаходить хроматичну дисперсію, оцінює втрати на вигині, обчислює

розширення імпульсу, та будує графіки залежностей d/Λ від ефективного показника заломлення, дисперсії, втрат при вигині, розширення імпульсу.

Програма працює наступним чином, спочатку відбувається запуск після чого на екран виводиться текст «ВВЕДЕННЯ ДАНИХ ТА 4 КОМБІНАЦІЙ d та Λ», та показує символ значення, яке треба ввести (рис. 2.3).

Після того коли користувач вводить всі дані та 4 різних комбінацій d та Λ, натискає кнопку ENTER, програма починає свої розрахунки, після чого виводить на екран результати розрахунків (рис. 2.4), та графіки залежності d/Λ на: ефективний показник заломлення, дисперсію, втрати та розширення імпульсу (рис. 2.5).

```
%% ---------------- EFFECTIVE INDEX ----------------
F = (pi/2) * r^2;
n_clad_eff = sqrt(F*1.0^2 + (1-F)*n_clad^2);
n_eff = n_core - 0.6*(n_core - n_clad_eff);
n_eff_arr(k) = n_eff;
%% ---------------- DISPERSION ----------------
n_core_lambda = n_core + 0.02*((lambda - lambda0)/lambda0).^2;
n_clad_lambda = n_clad + 0.01*((lambda - lambda0)/lambda0).^2;
n_clad_eff_lambda = sqrt(F*1.0^2 + (1-F)*n_clad_lambda.^2);
n_eff_lambda = n_core_lambda - 0.6*(n_core_lambda - n_clad_eff_lambda);
beta = 2*pi./lambda .* n_eff_lambda;
lambda_nm = lambda * 1e9;
d1 = gradient(beta, lambda_nm);
d2 = gradient(d1, lambda_nm);
D = -(lambda_nm./(2*pi*c)) .* d2;
D = D * 1e6;
D_mid = D(round(end/2));
D_arr(k) = D_mid;
```

Рисунок 2.2 – Функція визначення ефективного показника заломлення та хроматичної дисперсії

```
 9      n_clad = input('n_clad: ');
10      R = input('R (м): ');
```

```
Command Window
================================================
ВВЕДЕННЯ ДАНИХ ТА 4 КОМБІНАЦІЙ d та Λ
================================================
n_core: 1.45
n_clad: 1.42
R (м): 0.05
L (км): 10
Δλ (нм): 0.2
t0 (ps): 10
λ0 (м): 1.55e-6

--- Випадок 1 ---
Λ (м): 5e-6
d (м): 2e-6

--- Випадок 2 ---
Λ (м): 6e-6
d (м): 3e-6

--- Випадок 3 ---
Λ (м): 6e-6
d (м): 4e-6

--- Випадок 4 ---
Λ (м): 6e-6
d (м): 5e-6
```

Рисунок 2.3 – Зображення вводу даних

```
================ РЕЗУЛЬТАТИ ================
    d_over_Lambda     n_eff        D        Loss     Delta_t
    _____________     _____    _______    ______    _______

              0.4      1.3762   -4.1239    4.5586    10.817
              0.5       1.343   -4.0233     6.523    10.779
          0.66667      1.2659   -3.7888    8.5173    10.694
          0.83333      1.1516   -3.4405    10.737    10.575
```

Рисунок 2.4 – Результати розрахунків

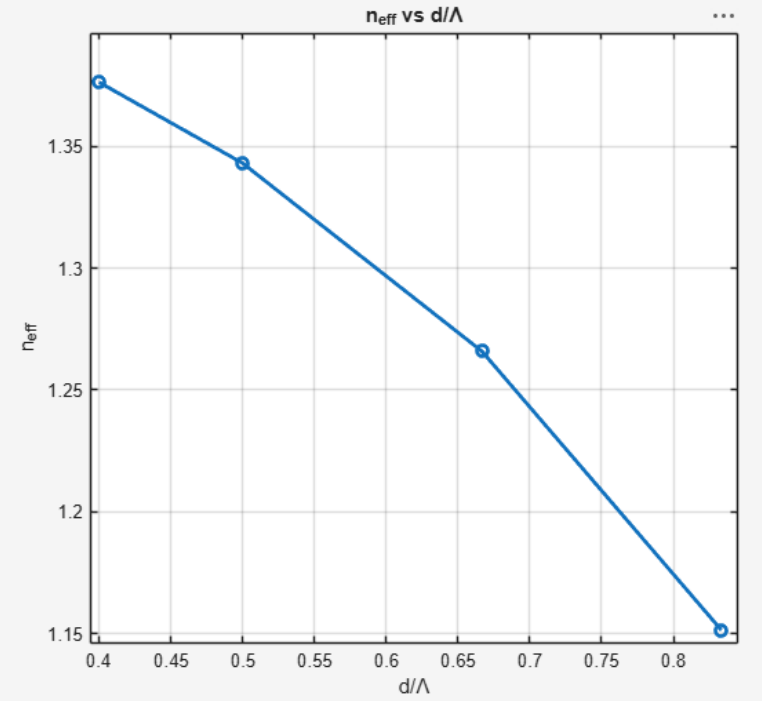


Рисунок 2.5 – Графік залежності ефективного показника заломлення від d/Λ

Усього графіків програма реалізовує 4 графіки, перший на рисунку 2.5 виведено графік залежності ефективного показника заломлення від d/Λ. Цей графік був реалізований за допомогою розрахунку по формулі, що реалізовано у коді (рис. 2.2). Ефективний показник заломлення дуже сильно залежить від n_{core}, n_{clad} та від d/Λ.

Другий графік що програма виводить на екран це графік залежності хроматичної дисперсії від d/Λ (рис. 2.6), Цей графік був реалізований за допомогою розрахунку по формулі, що реалізовано у коді (рис. 2.2). Показник хроматичної дисперсії сильно залежить від довжини хвилі λ, співвідношення d/Λ.

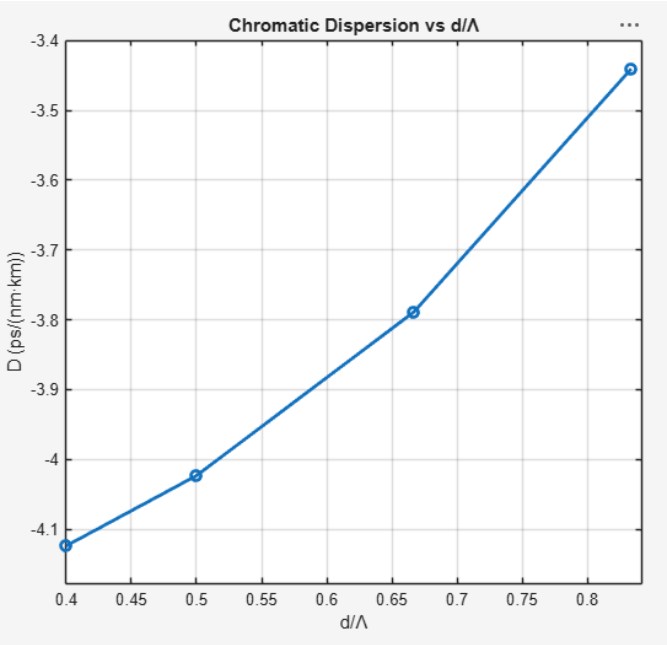


Рисунок 2.6 – Графік залежності хроматичної дисперсії від d/Λ

Третій графік що програма виводить на екран це графік залежності втрат оптичного сигналу від d/Λ (рис. 2.7), Цей графік був реалізований за допомогою розрахунку по формулі, що реалізовано у коді (рис. 2.8). Показник втрат при вигині сильно залежить від радіуса вигину волокна R, Ефективний показник заломлення n_{eff} та співвідношення d/Λ.

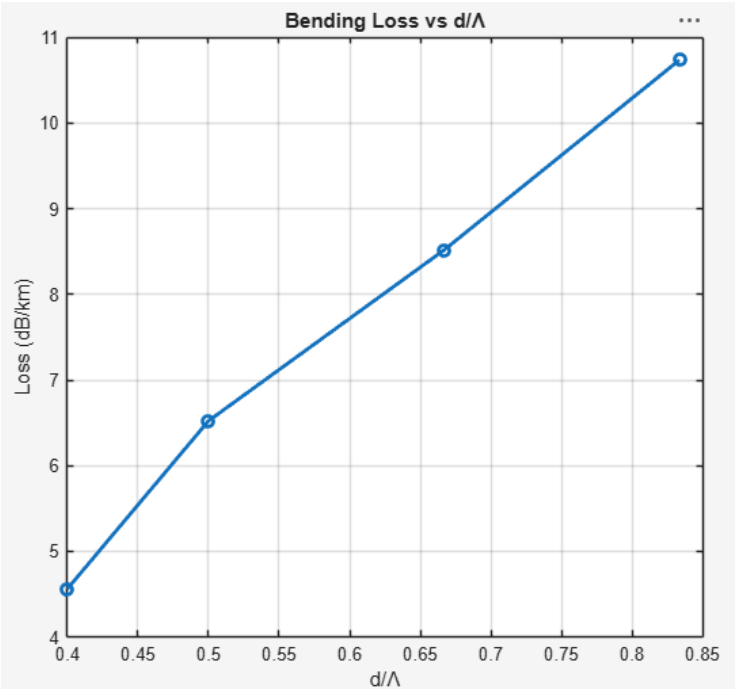


Рисунок 2.7 – Графік залежності втрат оптичного сигналу від d/Λ

```
%% ---------------- ВТРАТИ ----------------
a = Lambda/2;
V = (2*pi*a/lambda0) * sqrt(abs(n_core^2 - n_eff^2));
R_eff = R / (1 + a);
loss = 0.2 + exp(-2*R_eff*(1 - r)) * V;
loss_arr(k) = loss;
%% ---------------- імпульс ----------------
Dt_arr(k) = sqrt(t0^2 + (abs(D_mid)*L*Delta_lambda)^2);
end
```

Рисунок 2.8 – Функція визначення втрат та розширення імпульсу

Четвертий графік що програма виводить на екран це графік залежності d/Λ від розширення імпульсу (рис. 2.9), Цей графік був реалізований за допомогою розрахунку по формулі, що реалізовано у коді (рис. 2.8). Показник розширення імпульсу сильно залежить від хроматичної дисперсії D, довжини волокна L, спектральної ширини сигналу Δλ та довжини хвилі λ.

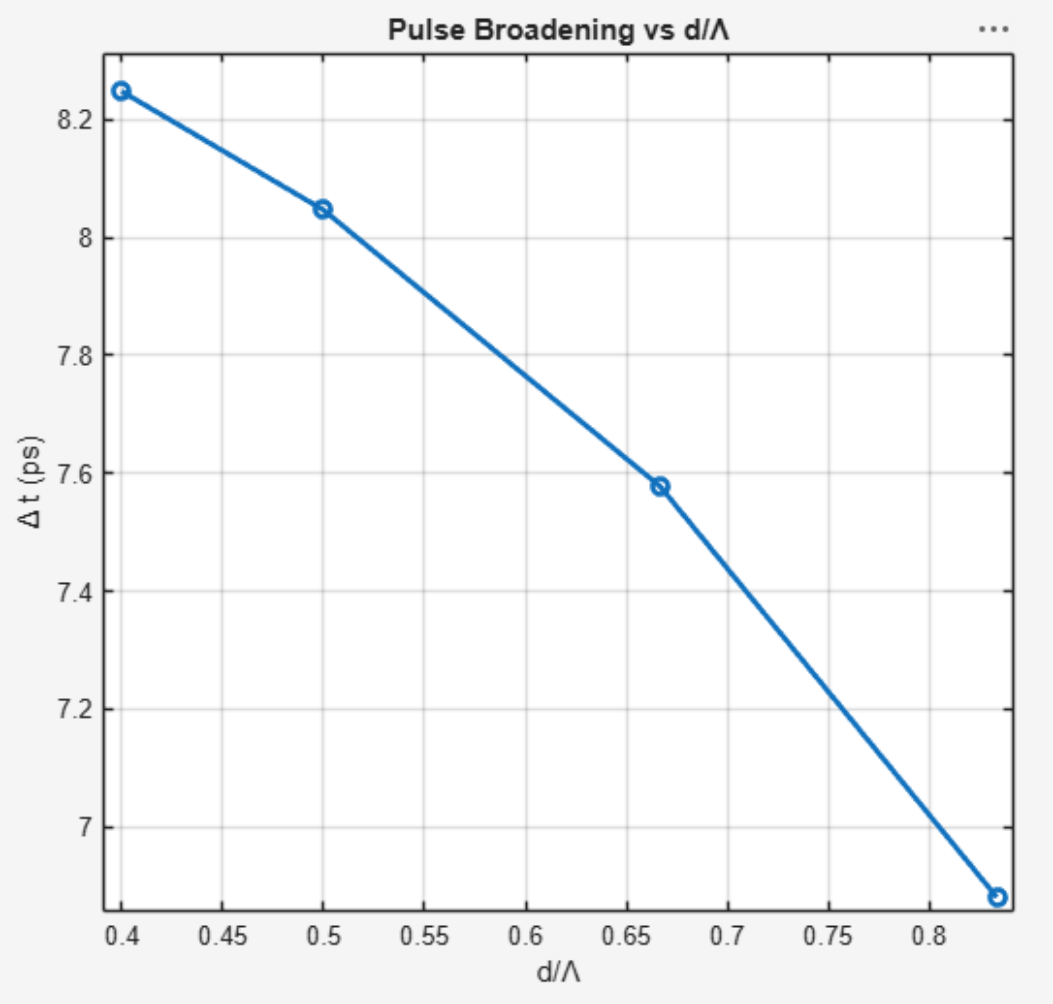


Рисунок 2.9 – Графік залежності розширення імпульсу від d/Λ

2.3 Автоматичне регулювання процесу витягування оптичного волокна

Процес витягування оптичного волокна є високочутливим до змін температури скляної заготовки та швидкості витягування. Навіть незначні відхилення призводять до зміни діаметра волокна, що безпосередньо впливає на його оптичні характеристики (ефективний показник заломлення, втрати, дисперсію).

Для забезпечення стабільної геометрії волокна використовується система автоматичного керування із замкненим зворотним зв’язком, яка регулює:

– температуру нагріву заготовки;

– швидкість витягування волокна;

– контроль діаметра в режимі реального часу.

Система працює за принципом зворотного зв’язку (рис. 2.10)

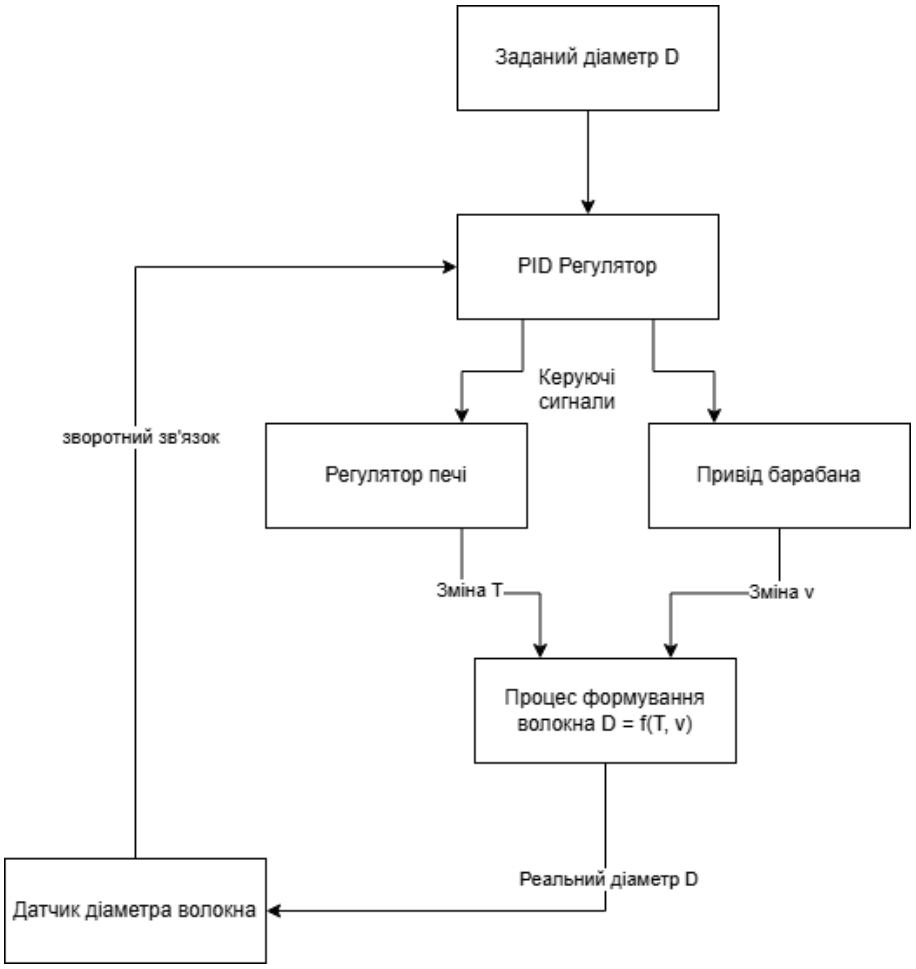


Рисунок 2.10 – Структурна схема системи із зворотним зв'язком

Діаметр волокна при витягуванні залежить від температури та швидкості витягування. Для контролю товщини використовується високоточний лазерний датчик діаметра, встановлений на виході з охолоджувального тракту. Датчик безперервно фіксує поточний діаметр (D) і передає сигнал на регулятор, замикаючи контур зворотного зв'язку.

В основі математичної моделі лежить закон збереження маси рівняння нерозривності потоку для нестисливого розплаву.

$$\mathrm{A_з} \cdot v_з = \mathrm{A_в} \cdot v, \tag{2.6}$$

де $\mathrm{A_з}$ – площі перерізу заготовки;

$\mathrm{A_в}$ – площі перерізу волокна;

$v_з$ – швидкість подачі заготовки;

v – швидкість витягування.

Оскільки переріз круглий отримуємо:

$$\mathrm{A} = \frac{\pi D^2}{4}, \tag{2.7}$$

$$D_з^2 \cdot v_з = D^2 \cdot v. \tag{2.8}$$

Враховуючи вплив температури через коефіцієнт в'язкості K(T), кінцеве параметричне рівняння процесу має вигляд:

$$D = \sqrt{\frac{D_з^2 \cdot v_з}{v}} \cdot K(T). \tag{2.9}$$

Температурний коефіцієнт зміни геометрії (K(T) пропорційний відносній зміні в'язкості:

$$K(T) = \sqrt{\frac{\eta(T)}{\eta_0}}, \tag{2.10}$$

де η – реальна в'язкість скла;

η_0 – номінальна в'язкість.

Для розрахунку в'язкості кварцового скла в залежності від температури використаємо фундаментальне рівняння Фогеля-Фулчера-Таммана:

$$ln\ \eta(T) = A + \frac{B}{T - T_0}, \tag{2.11}$$

де A, B, T_0 – емпіричні константи для кварцового скла:

– A = -6,2;

– B = 14200 K;

–T_0 = 250.

Тоді повне параметричне рівняння процесу набуває вигляду:

$$D = \sqrt{\frac{D_з^2 \cdot v_з}{v}} \cdot \sqrt{\frac{\eta(T)}{\eta_0}}. \tag{2.12}$$

Розраховую параметричне рівняння процесу витягування волокна, вихідні дані для розрахунку:

– діаметр заготовки: $D_з$ = 40мм = 0,04 м;

– швидкість подачі заготовки: $v_з$ = 2мм/с = 0,002 м/с;

– швидкість витягування: v = 20м/с;

– номінальна температура печі: $T_{ном}$ = 2273 K;

– реальна температура в печі через коливання: T = 2230K, температура впала на 43 градуси;

Розрахунок номінальної в'язкості η_0 при $T_{ном}$ = 2273 K:

$$ln\,\eta_0 = -6{,}2 + \frac{14200}{2273 - 250} = -6{,}2 + 7{,}019 = 0{,}819,$$

$$\eta_0 = e^{0{,}819} \approx 2{,}268 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Розрахунок реальної в'язкості $\eta(T)$ при Т 2230 К, тобто при падінні температури:

$$ln\,\eta(T) = -6{,}2 + \frac{14200}{2230 - 250} = -6{,}2 + 7{,}172 = 0{,}972,$$

$$\eta(T) = e^{0{,}972} \approx 2{,}643 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Розрахунок температурного коефіцієнта К(Т):

$$K(T) = \sqrt{\frac{\eta(T)}{\eta_0}} = \sqrt{\frac{2{,}643}{2{,}268}} = \sqrt{1{,}165} \approx 1{,}079.$$

Розрахунок фінального діаметра волокна, підставляю всі значення, включаючи розрахований коефіцієнт, у параметричне рівняння:

$$D = \sqrt{\frac{0{,}04^2 \cdot 0{,}002}{20}} \cdot 1{,}079 = 0{,}0004 \cdot 1{,}079 = 0{,}0004316 \text{ м}.$$

Через падіння температури до 2230 К скло стало густішим. Розрахований діаметр волокна збільшився до 431,6 мкм відхилення від норми склало +31,6 мкм. Це доводить необхідність роботи система автоматичного регулювання, яка зафіксує це відхилення датчиком та подасть команду на збільшення потужності печі, щоб повернути К(Т) до одиниці.

Впровадження системи автоматичного керування з датчиком діаметра

дозволяє підтримувати стабільний діаметр волокна, компенсувати коливання температури та швидкості, підвищити повторюваність та якість оптичного волокна, зменшити вплив людського фактора.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ D/Λ НА ПАРАМЕТРИ МОВ

3.1 Дослідження впливу параметра d/Λ на: ефективний показник заломлення, дисперсію, втрати, розширення імпульсу

Одним із найважливіших параметрів мікроструктурованого оптичного волокна є співвідношення діаметра повітряних отворів до кроку їх розташування (d/Λ). Саме цей параметр значною мірою визначає оптичні властивості волокна, оскільки характеризує структуру оболонки та ступінь її заповнення повітрям.

Дослідження впливу параметра (d/Λ) на ефективний показник заломлення, хроматичну дисперсію, втрати оптичного сигналу та розширення імпульсу є важливим етапом проєктування мікроструктурованих оптичних волокон. Таке дослідження дозволяє встановити взаємозв'язок між геометричними параметрами структури та характеристиками поширення світла у волокні.

Аналіз залежності ефективного показника заломлення від параметра (d/Λ) дає змогу оцінити вплив геометрії оболонки на умови поширення електромагнітної хвилі та ступінь локалізації оптичного поля в серцевині волокна. Отримані результати дозволяють визначити діапазон значень (d/Λ), за яких забезпечується необхідний режим роботи волокна.

Дослідження хроматичної дисперсії залежно від параметра (d/Λ) є важливим для оцінювання якості передачі інформації в оптичних системах зв'язку. Зміна співвідношення (d/Λ) дозволяє керувати дисперсійними властивостями волокна та підбирати такі геометричні параметри, які забезпечують мінімальні спотворення оптичних імпульсів під час поширення.

Аналіз втрат при вигині дає можливість оцінити стійкість волокна до механічних деформацій. Отримані залежності дозволяють визначити

оптимальні параметри структури, за яких втрати енергії залишаються мінімальними навіть при невеликих радіусах вигину.

Дослідження впливу параметра (d/Λ) на розширення імпульсу дозволяє оцінити швидкодію волоконно-оптичної лінії передачі та її придатність для високошвидкісних телекомунікаційних систем. Зменшення розширення імпульсу сприяє підвищенню пропускної здатності каналу зв'язку та покращенню якості передачі інформації.

Проводити перше дослідження будемо в програмі з другого розділу роботи. Дослідження №1, збільшення значення залежності d/Λ від 0,4. Вводжу спочатку початкові значення (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 Початкові значення дослідження №1

n_{core}	n_{clad}	R (м)	L (км)	Δλ(нм)	t0 (ps)	λ0 (м)	
1,45	1,42	0,05	10	02	10	$1{,}55\cdot 10^{-6}$	
Випадок 1		Випадок 2		Випадок 3		Випадок 4	
Λ (м)	d (м)	Λ (м)	d (м)	Λ (м)	d (м)	Λ (м)	d (м)
$5\cdot 10^{-6}$	$2\cdot 10^{-6}$	$6\cdot 10^{-6}$	$3\cdot 10^{-6}$	$6\cdot 10^{-6}$	$4\cdot 10^{-6}$	$6\cdot 10^{-6}$	$5\cdot 10^{-6}$

Тобто зараз значення d/Λ збільшується від 0,4 до 0,83333. Запускаю розрахунок отримую значення розрахунків (табл. 3.2) та графіки залежності (рис 2.5 – 2.9).

Таблиця 3.2 Результати розрахунків

d/Λ	n_{eff}	D	Loss	Δt
0,4	1,3762	-4,1239	4,5586	8,2479
0,5	1,343	-4,0233	6,523	8,0465
0,67	1,2659	-3,7888	8,5173	7,5777
0,83	1,1516	-3,4405	10,737	6,881

Судячи з результатів табл. 3.2 і з рис. 2.5 – 2.9, при збільшені d/Λ ефективний показник заломлення зменшується, це зумовлено тим, що зростає частка повітря в оболонці мікроструктурованого оптичного волокна, що призводить до зменшення її ефективного показника заломлення. Оскільки світлова мода поширюється не лише в серцевині, а й частково в оболонці, ефективний показник заломлення основної моди також зменшується.

Хроматична дисперсія при збільшені d/Λ зростає, стає менш від'ємним, тобто алгебраїчно зростає. Водночас її абсолютне значення (модуль) зменшується. Це зумовлюється тим, що зростає частка повітря в оболонці фотонно-кристалічного волокна, що підвищує контраст показників заломлення між серцевиною та оболонкою. Це посилює хвилевидну дисперсію та збільшує залежність ефективного показника заломлення від довжини хвилі. Унаслідок цього загальна хроматична дисперсія волокна зростає. Хроматична дисперсія по модулю зменшується через те, що змінюється структура оболонки волокна та перерозподіл електромагнітного поля, внаслідок чого хвилевидна дисперсія частково компенсує матеріальну.

Зі збільшенням відношення d/Λ спостерігається зростання втрат оптичного сигналу, так виходить через те, що зменшується кількість скляного матеріалу в оболонці мікроструктурованого волокна, що призводить до зниження ефективного показника заломлення оболонки та зменшення контрасту показників заломлення між серцевиною і оболонкою. У результаті погіршується утримання моди в серцевині та збільшується її просторове розширення. Через це при вигині волокна значна частина модового поля легше виходить за межі хвилевидної структури, що призводить до зростання втрат.

Зі збільшенням параметра d/Λ зменшується розширення імпульсу, через те, що послаблюється хвилевидне утримання моди, що призводить до зниження хвилевидної складової дисперсії. У результаті зменшується хроматична дисперсія в модулі , а отже і величина розширення імпульсу Δt, що пояснюється прямою пропорційною залежністю між цими величинами.

Дослідження №2, зменшення значення залежності d/Λ від 0,4. Вводжу спочатку початкові значення (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 початкові значення дослідження №2

n_{core}	n_{clad}	R (м)	L (км)	Δλ(нм)	t0 (ps)	λ0 (м)	
1,45	1,42	0,05	10	02	10	$1{,}55 \cdot 10^{-6}$	
Випадок 1		Випадок 2		Випадок 3		Випадок 4	
Λ (м)	d (м)	Λ (м)	d (м)	Λ (м)	d (м)	Λ (м)	d (м)
$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$0{,}5 \cdot 10^{-6}$

Тобто зараз значення залежності d/Λ зменшується від 0,4 до 0,1. Запускаю розрахунок отримую значення розрахунків (табл. 3.4) та графіки залежності (рис 3.1 – 3.4).

Таблиця 3.4 Результати розрахунків дослідження №2

d/Λ	n_{eff}	D	Loss	Δt
0,4	1,3762	-4,1239	4,5586	8,2479
0,3	1,4011	-4,1994	3,7288	8,3988
0,2	1,4184	-4,2519	3,0165	8,5038
0,1	1,4286	-4,2829	2,4977	8,5658

Судячи з результатів табл. 3.4 і на рис. 3.1, при зменшені d/Λ ефективний показник заломлення збільшується, це зумовлено тим, що зменшення відносної частки повітряних отворів у структурі мікроструктурованого оптичного волокна, внаслідок чого збільшується кількість скляного матеріалу в області оболонки. Це спричиняє підвищення ефективного показника заломлення оболонки $n_{clad,eff}$, оскільки середовище стає більш однорідним і наближається за оптичними властивостями до чистого кварцового скла. У результаті зменшується контраст показників заломлення між серцевиною та оболонкою волокна.

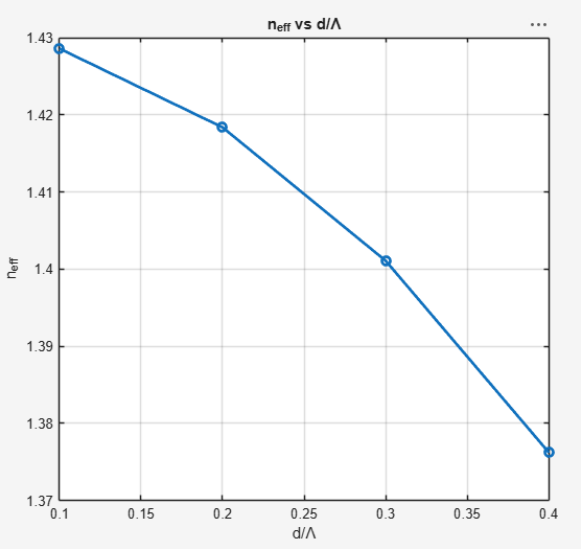


Рисунок 3.1 – Графік залежності ефективного показника заломлення від d/Λ

Судячи з результатів табл. 3.4 і на рис. 3.2, при зменшені d/Λ хроматична дисперсія зменшується стає більш від'ємним, тобто алгебраїчно меншає. Водночас її абсолютне значення (модуль) збільшується. Це зумовлюється тим, що при зменшенні d/Λ зменшується кількість повітря в оболонці, зростає ефективний показник заломлення та зменшується оптичний контраст між серцевиною та оболонкою, що змінює умови поширення моди. У результаті дисперсія стає більш від’ємною, але її модуль збільшується.

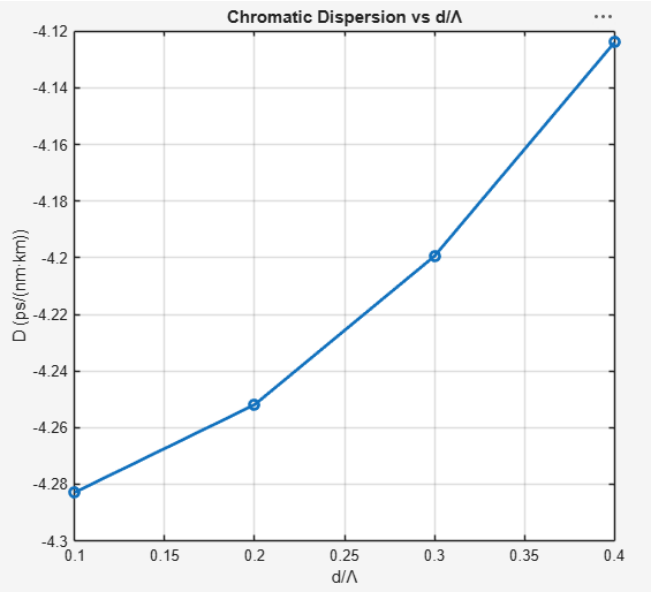


Рисунок 3.2 – Графік залежності хроматичної дисперсії від d/Λ

Судячи з результатів табл. 3.4 і на рис. 3.3, при зменшені d/Λ спостерігається зменшення втрат оптичного сигналу, це зумовлено тим, що при зменшенні d/Λ зменшується частка повітряних отворів у структурі волокна, внаслідок чого зростає ефективний показник заломлення оболонки та зменшується розширення модового поля. Мода стає більш локалізованою в серцевині, що підсилює її утримання хвилевидною структурою. У таких умовах знижується проникнення поля в оболонку та зменшується чутливість до геометричних деформацій, зокрема до вигину волокна.

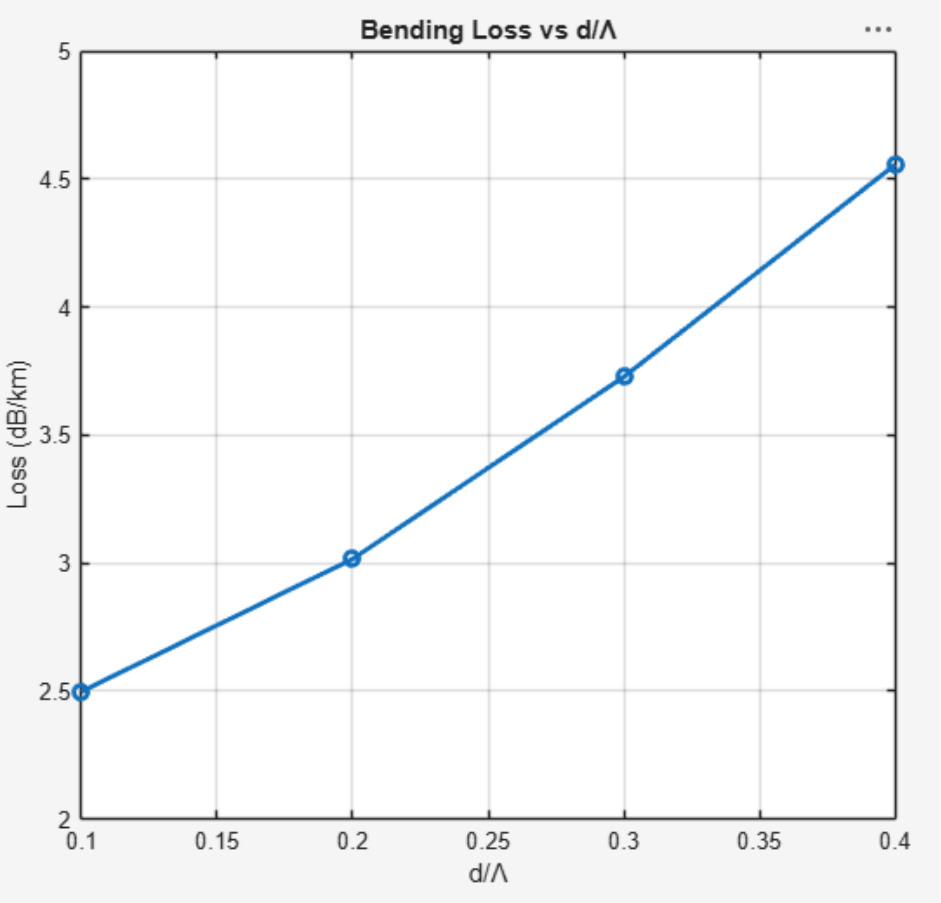


Рисунок 3.3 – Графік залежності втрат оптичного сигналу від d/Λ

Судячи з результатів табл. 3.4 і на рис. 3.4, при зменшені d/Λ спостерігається збільшення розширення імпульсу, це зумовлено тим, що зменшується хвилевидна складова дисперсії через ослаблення впливу мікроструктури оболонки. Через це зростає значення хроматичної дисперсії |D|, що відповідно призводить до збільшення розширення імпульсу Δt.

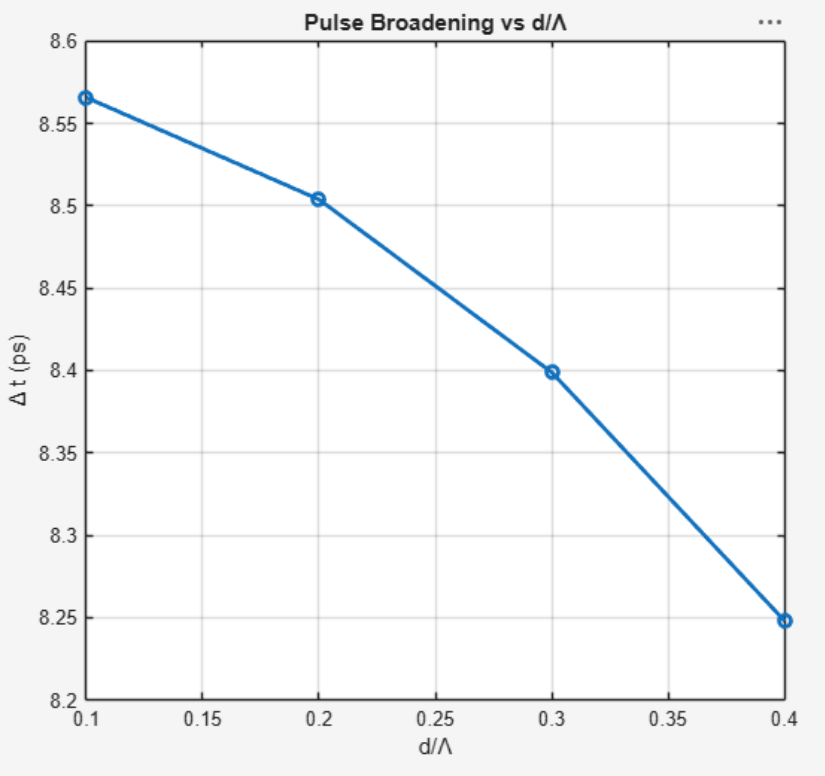


Рисунок 3.4 – Графік залежності розширення імпульсу від d/Λ

За результатами моделювання встановлено, що зі збільшенням (d/Λ) зростає частка повітря в оболонці волокна, що призводить до зменшення ефективного показника заломлення. Одночасно зменшується модуль хроматичної дисперсії та розширення імпульсу, однак зростають втрати оптичного сигналу через послаблення утримання оптичної моди в серцевині.

При зменшенні параметра (d/Λ) спостерігається протилежна тенденція: ефективний показник заломлення збільшується, модуль хроматичної дисперсії та розширення імпульсу зростають, а втрати оптичного сигналу зменшуються внаслідок кращої локалізації модового поля в серцевині волокна.

Отримані результати підтверджують, що параметр (d/Λ) суттєво впливає на оптичні властивості мікроструктурованого волокна та є одним із ключових конструктивних параметрів при його проєктуванні. Зміною цього співвідношення можна керувати дисперсійними характеристиками, втратами при вигині та якістю передавання оптичних сигналів, що дозволяє підбирати оптимальну геометрію волокна відповідно до вимог конкретної телекомунікаційної системи.

3.2 Охорона праці

Розроблення та дослідження програмного забезпечення для автоматизації процесу визначення оптико-геометричних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна виконувалося в умовах комп'ютерної лабораторії. Робота пов'язана з тривалим використанням персонального комп'ютера та належить до категорії робіт «легка 1б» згідно з ДСН 3.3.6.042-99, оскільки виконується сидячи та не потребує значних фізичних навантажень. Енерговитрати працівника при цьому становлять 121...150 ккал/год.

Для забезпечення комфортних умов праці у приміщенні лабораторії повинні підтримуватися нормативні параметри мікроклімату. У холодний період року температура повітря має становити 21...23 °С, у теплий – 22...25 °С, відносна вологість повітря – 40...60 %, швидкість руху повітря – не більше 0,1...0,2 м/с. Для підтримання зазначених параметрів використовуються системи опалення та кондиціонування.

При розробленні програмного забезпечення в MATLAB основне навантаження припадає на органи зору, тому важливим фактором є належне освітлення робочого місця. Роботи з використанням комп'ютерної техніки відносяться до робіт високої точності, для яких нормативне значення освітленості становить 300...400 лк.

Тривалий час розроблення та тестування програмного забезпечення в середовищі MATLAB негативно впливає на оператора, який працює за персональним комп'ютером. Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами є:

– тривале статичне навантаження на опорно-руховий апарат;

– перенапруження органів зору;

– нервово-емоційні навантаження, пов'язані з аналізом результатів розрахунків;

– дія електромагнітних та електростатичних полів;

– можливість ураження електричним струмом;

– підвищений рівень шуму від комп'ютерної техніки.

Оскільки існує кілька видів шкідливих впливів, існує і кілька шляхів їх запобігання.

Для захисту від електромагнітних і електростатичних полів допускається застосування екранних фільтрів, спеціальних екранів та інших засобів індивідуального захисту, що пройшли випробування і мають відповідний гігієнічний сертифікат.

При використанні захисних фільтрів, одягаються або вбудовуються в корпус монітора, вони обов'язково повинні бути заземлені.

З метою попередження захворювань користувачів, викликаних впливом випромінювання при роботі на ПК, рекомендується застосовувати монітори зі зниженим рівнем випромінювання, що відповідають міжнародним стандартам MPR-II, TCO'95, TCO'99, і контролювати дотримання працюючими регламентованих режимів праці та відпочинку. Для зменшення шуму в приміщенні з ПК, як правило, застосовують метод акустичної обробки приміщень, використовуючи для облицювання огороджувальних поверхонь звукопоглинальні матеріали з максимальними коефіцієнтами звукопоглинання (α) в інтервалі частот 63 Гц – 8000 Гц. Із цією метою на стелях і стінах розміщують перфоровані панелі з звукопоглинальним наповнювачем. Панелі зміцнюють безпосередньо на поверхні огорожі або з віднесенням від нього на відстань 20 см. В останньому випадку застосування звукопоглинальної облицювання більш ефективно.

Додатковим звукопоглинанням можуть служити однотонні завіси з щільної тканини, що гармоніюють з забарвленням стін і підвішені в складку на відстані 15...20 см від віконного скла. Ширина завіси повинна бути в два рази більше ширини вікна. Знизити рівень шуму можна також, використовуючи для друку малошумні лазерні принтери.

Заходи, що ведуть до усунення нервово-емоційних перевантажень:

– використання зручного і вдосконаленого інтерфейсу. Не допущення

використання яскравих контрастних зображень і різку їх зміну, тобто використання в міру можливості набір півтонів;

– виключення присутності на екрані несистематизованої інформації у великій кількості;

– користувачам необхідно забезпечити обчислювальні засоби достатньої швидкодії. Час реакції на запит не повинен перевищувати в середньому 5...10 секунд.

Лабораторія, у якій проводиться розроблення програмного забезпечення та виконуються розрахунки в MATLAB, належить до категорії В за пожежною небезпекою. Основними джерелами виникнення пожежі можуть бути короткі замикання в електричних мережах, перевантаження електрообладнання, несправність комп'ютерної техніки та блоків живлення.

Для забезпечення пожежної безпеки приміщення повинно бути обладнане:

– автоматичною пожежною сигналізацією;

– двома вуглекислотними вогнегасниками типу ВВК-2;

– пожежними сповіщувачами;

– планом евакуації;

– засобами аварійного відключення електроживлення.

Забороняється використовувати несправні електроприлади, перевантажувати електромережу, залишати без нагляду увімкнене обладнання та захаращувати евакуаційні виходи.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи бакалавра проведено аналіз будови, принципу роботи та особливостей мікроструктурованих оптичних волокон. Досліджено основні оптико-геометричні параметри, що визначають характеристики поширення світла у волокні, а саме: діаметр повітряних отворів, крок їх розташування, співвідношення d/Λ, ефективний показник заломлення, хроматичну дисперсію та втрати оптичного сигналу. Також проаналізовано сучасні математичні моделі та чисельні методи розрахунку, серед яких метод ефективного середовища, метод скінченних елементів та метод скінченних різниць у часовій області.

На основі проведеного аналізу розроблено алгоритм автоматизованого визначення основних параметрів мікроструктурованого оптичного волокна та реалізовано програмний засіб у середовищі MATLAB. Створена програма дозволяє вводити початкові параметри волокна, автоматично виконувати необхідні розрахунки, визначати ефективний показник заломлення, хроматичну дисперсію, втрати оптичного сигналу та розширення імпульсу, а також будувати графічні залежності отриманих характеристик.

Проведено дослідження впливу співвідношення d/Λ на основні параметри мікроструктурованого оптичного волокна. Отримані результати показали, що зі збільшенням значення d/Λ ефективний показник заломлення зменшується, хроматична дисперсія змінюється, зростають втрати оптичного сигналу та зменшується розширення імпульсу. При зменшенні значення d/Λ спостерігаються протилежні закономірності. Це підтверджує значний вплив геометричних параметрів структури на оптичні властивості волокна.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. - 29 с.

2. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, О.В. Токарєва, С.П. Новоселов, О.В. Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2023. – 64 с.

4. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньої програми «Системна інженерія» [Електронний ресурс] : навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарєва, О. М. Цимбал, А. І. Бронніков ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. 218 с. ISBN 978-617-8332-16-7; DOI: 10.30837/978-617-8332-16-7

5. Матеріально-технічне забезапечення | Кафедра Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії. Кафедра Кафедра Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії | Сайт

кафедри Кафедра Кафедра комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії ХНУРЕ. URL: https://tapr.nure.ua/dijalnist-kafedri/materialno-tehnichne-zabezapechennja.

6. Paschotta R. Photonic Crystal Fibers. *RP Photonics Encyclopedia*. 2026. URL: https://www.rp-photonics.com/photonic_crystal_fibers.html (дата звернення: 22.04.2026).

7. Russell P. Photonic Crystal Fibers. *Science*. 2003. Vol. 299, no. 5605. P. 358–362.

8. Poli F., Cucinotta A., Selleri S. Photonic Crystal Fibers: Properties and Applications. Berlin : Springer, 2007. 248 p.

9. Saitoh K., Koshiba M. Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion. *Optics Express*. 2005. Vol. 13, no. 1. P. 267–274.

10. Світловоди зі складним профілем показника заломлення та мікроструктуровані волокна: монографія / В. Г. Левицький та ін. Київ : Наукова думка, 2015. 210 с.

11. Інтерферометр на полімерному оптичному волокні як перетворювач для вимірювання механічних величин / В.І. Варищук. Львів: Дисертація 2021. 150с.

12. Fiber-Optic Communication Systems Third Edition / John Wiley. New York: publication, 2002. 563 p.

13. O. Filipenko, O. Sychova, S. Novoselov, "Study of the influence structures inconsistency of photonic crystal fibers cross-sectional on the characteristics of their connection process," Speckle 2023: VIII International Conference on Speckle Metrology, vol. 13070, SPIE, 2024, https://doi.org/10.1117/12.3014319.

14. O. Filipenko, O. Sychova, S. Novoselov, "Modeling, decision support, and software for automated positioning of photonic crystal fiber," in Sixteenth International Conference on Correlation Optics. SPIE, vol. 12938, pp. 21-24, Jan., 2024, https://doi.org/10.1117/12.3008982.

15. Автоматизація процесів з’єднання фотонно-кристалічних волокон:

монографія / О.І. Филипенко, І.Ш. Невлюдов, О.В. Сичова. – Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2022. – 142 с. https://doi.org/10.30837/978-617-8059-30-9. ISBN 978-617-8059-30-9.

16. I. Nevliudov, O. Filipenko and O. Sychova, "Mathematical Technique for Photonic Crystal Fibers Automated Positioning Module," 2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Odessa, Ukraine, 2020, pp. 1-4. https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9234991.

17. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: Підручник Харків: ФОП Панов А. М., 2021., 604 с. ISBN 978-617-7947-67-6

18. Основи наукових досліджень: підручник / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Prague : OKTAN PRINT, 2024. 468 с. ISBN 978-80-88618-68-3; e-book ISBN 978-80-88618-60-0; DOI 10.46489/ONDNP-24-12.

19. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарєва. Харків: ХНУРЕ, 2020. 240 с.