

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

О.І. Филипенко, І.Ш. Невлюдов, О.В. Сичова

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ З'ЄДНАННЯ
ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН**

МОНОГРАФІЯ



*Рекомендовано Науково-технічною радою
Харківського національного університету радіоелектроніки
(протокол № 13 від 18.11.2021 року)*

Филипенко О.І.

Ф 53 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.

ISBN 978-617-8059-30-9.

DOI: 10.30837/978-617-8059-30-9.

В монографії розглядаються питання удосконалення методів та засобів технологічного, інформаційного та математичного забезпечення автоматизованих процесів позиціонування фотонно-кристалічних волокон під час з'єднання.

В роботі виконано теоретичне обґрунтування побудови автоматизованих систем керування процесами позиціонування фотонно-кристалічних волокон при їх з'єднанні. Результатом став подальший розвиток та вдосконалення комплексу математичного забезпечення за рахунок розробки методу автоматизованого позиціонування фотонно-кристалічних волокон за їх осями, побудованими на основі послідовно визначених методом автозгортки координат центру розподілу оптичного поля, виміряного в задній площині перпендикулярно опромінених фотонно-кристалічних волокон, та представлених лінійною регресійною моделлю, що дозволило підвищити якість з'єднання та зменшити втрати оптичної потужності сигналу у з'єднанні, а також метод, який дозволяє узгодити розподіли модових полів на торцях поздовжньо збуджених фотонно-кристалічних волокон шляхом визначення та врахування куту взаємного повороту волокон навколо їх поздовжньої осі, що дало змогу враховувати структуру модового поля волокна в процесі з'єднання та зменшити оптичні втрати. Проведено моделюючі та фізичні експериментальні дослідження, що довели досягнення потрібних показників точності позиціонування фотонно-кристалічних волокон та, як наслідок, покращення характеристик якості їх з'єднань.

Монографія може бути корисна науковцям, аспірантам, студентам, які займаються питаннями автоматизованого з'єднання оптичних волокон і фахівцям у галузі волоконної оптики.

УДК 681.7.068:621.38]:681.51

Рецензенти:

О. В. Бондаренко, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри волоконно-оптичних ліній електронних комунікацій, Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку;

М. В. Замірець, д-р техн. наук, професор, в.о. директора, державне підприємство Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень | 5 |
| Вступ | 6 |
| 1 Аналіз завдань автоматизації процесів з'єднання фотонно-кристалічних волокон | 9 |
| 1.1 Компоненти на основі фотонно-кристалічних волокон як об'єкт автоматизації | 9 |
| 1.2 Технологічні процеси з'єднань фотонно-кристалічних волокон | 16 |
| 1.2.1 Процеси виконання роз'ємного з'єднання фотонно-кристалічних волокон | 17 |
| 1.2.2 Процеси зварювання фотонно-кристалічних волокон | 23 |
| 1.2.3 Методи контролю оптико-геометричних параметрів оптичних волокон | 31 |
| 1.3 Технологічні фактори втрат оптичного сигналу в фотонно-кристалічних волокнах та їх з'єднаннях | 36 |
| 1.3.1 Внутрішні технологічні фактори втрат у ФКВ та їх вплив на процеси з'єднання | 36 |
| 1.3.2 Зовнішні технологічні фактори втрат у ФКВ та їх вплив на процеси з'єднання | 39 |
| 2 Структура автоматизованої системи керування процесами з'єднання фотонно-кристалічних волокон | 46 |
| 2.1 Математична модель автоматизованого керування процесом з'єднання фотонно-кристалічних волокон | 46 |
| 2.2 Структурні схеми автоматизованих модулів контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон | 51 |
| 3 Метод контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон в процесі з'єднання за лінійними координатами | 57 |
| 3.1 Метод контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон в процесі з'єднання | 57 |
| 3.2 Моделювання та дослідження точності процесу позиціонування ФКВ при поперечному освітленні за допомогою метода автозгортки | 67 |
| 3.3 Структурна схема системи керування позиціонуванням фотонно-кристалічних волокон за лінійними координатами | 71 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 4 | Метод прецизійного позиціонування фотонно-кристалічних волокон за кутом повороту | 77 |
| 4.1 | Вплив неузгодженості структур поперечного перетину ФКВ на характеристики процесу їх з'єднань | 77 |
| 4.2 | Метод визначення положення координат центру модового поля фотонно-кристалічного волокна та його максимального діаметру | 97 |
| 4.3 | Система керування позиціонуванням ФКВ за кутом повороту навколо поздовжньої осі | 104 |
| 5 | Експериментальні дослідження методу позиціонування та контролю в автоматизованому процесі з'єднання фотонно-кристалічних волокон..... | 107 |
| 5.1 | Дослідження застосування методу автозгортки для процесу позиціонування в нероз'ємних з'єднаннях ФКВ | 107 |
| 5.2 | Дослідження процесу позиціонування ФКВ за максимальним діаметром модового поля | 123 |
| | Висновки | 130 |
| | Список використаних джерел | 132 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ

- АЗ – алгоритмічне забезпечення;
- АСК – автоматизована система керування;
- ВОСПІ – волоконно-оптичні системи передачі інформації;
- ГВС – гнучких виробничих систем;
- дБ – децибел;
- ІЗ – інформаційне забезпечення;
- МЗ – математичне забезпечення;
- мкм – мікромметр;
- ОВ – оптичне волокно;
- ПЗ – програмне забезпечення;
- ПЗЗ – прилад з зарядовим зв'язком;
- СТЗ – системи технічного зору;
- ТЗ – технічне забезпечення;
- ТОК – технологічний об'єкт керування;
- ФЗ – функціональне забезпечення;
- ФЗЗ – фотонна заборонена зона;
- ФКВ – фотонно-кристалічне волокно;
- DWDM – dense wavelength division multiplexing;
- HF – holey optical fiber;
- MOF – microstructure optical fiber;
- PCF – photonic crystal fiber;
- c – швидкість світла в вакуумі;
- D – діаметр оболонки фотонно-кристалічного волокна;
- d – діаметр отвору в оболонці фотонно-кристалічного волокна;
- λ – довжина хвилі;
- n – показник заломлення;
- n_{eff} – ефективний показник заломлення ФКВ.

ВСТУП

В останні роки великий інтерес викликає розробка та дослідження фотонно-кристалічних волокон (Photonic crystal fiber, PCF), які також називають мікроструктурованими (Microstructure optical fiber, MOF) або дірчатими (Holey optical fiber, HF) оптичними волокнами [1-9].

Завдяки специфічній структурі поперечного перетину, фотонно-кристалічні волокна (ФКВ) мають унікальні властивості не притаманні стандартним одномодовим або багатомодовим оптичним волокнам (ОВ). Тому вже зараз очевидні перспективи використання ФКВ у якості різноманітних компонентів: компенсаторів дисперсії, ефективних раманівських лазерів, оптичних підсилювачів, перемикачів, мультиплексорів, демультимплексорів, генераторів суперконтинууму тощо [3, 10].

Технології виготовлення фотонно-кристалічних волокон (ФКВ) постійно удосконалюються, а характеристики передачі сигналу в таких волокнах наближуються до параметрів стандартних оптичних волокон (ОВ) [8, 11-12]. Але для впровадження ФКВ в існуючі оптичні телекомунікаційні системи необхідно також вирішити проблему забезпечення якісного стикування їх зі стандартними оптичними волокнами або з іншими фотонно-кристалічними волокнами.

Сучасні методи, які використовуються для з'єднання стандартних ОВ мають низку недоліків для застосування їх у з'єднаннях ФКВ [12-22]. Насамперед це пов'язано зі складною геометричною структурою ФКВ, а також з їх специфічними оптичними характеристиками. Як і у випадку з'єднання стандартних оптичних волокон, з'єднання ФКВ може виконуватися роз'ємним або нероз'ємним. Але в обох випадках цей процес виявляється набагато трудомістким та потребує більшої точності виконання. Під час позиціонування ФКВ в процесі з'єднання за допомогою класичних методів неможливо визначити положення серцевини волокна за його зображенням, тому що повітряні отвори в оболонці спотворюють картину інтенсивності випромінювання, отриману поперечним зондуванням ФКВ світловим променем, на відмінну від стандартного ОВ, де серцевина чітко виділяється на фоні оболонки. Крім того внаслідок складної структури модового поля

фотонно-кристалічних волокон виникають труднощі позиціонування за формою і розмірами модових полів, що може призвести до виникнення неприпустимих втрат сигналу у місцях стику.

У зв'язку з цим важливим та актуальним науково-прикладним завданням є розробка методів та засобів технологічного, інформаційного та математичного забезпечення, які гарантують задані параметри процесів позиціонування ФКВ та відповідно низькі оптичні втрати у їх з'єднаннях.

Монографія складається з п'яти розділів. В першому розділі розглянуто різновиди фотонно-кристалічних волокон, проаналізовано вплив геометрії поперечного перетину та показника заломлення на розповсюдження світла в них. Розглянуто перспективи застосування ФКВ в телекомунікаційних системах. Проаналізовано існуючі технології з'єднання оптичних волокон та виділено фактори втрат у ФКВ та їх з'єднаннях. Наведено короткий огляд стану питання у світі та проблем, які виникають в процесі з'єднання фотонно-кристалічних волокон.

У другому розділі за результатами синтезу структури автоматизованих систем контролю позиціонування ФКВ визначено специфічні завдання із подальшої розробки моделей та методів, що становлять зміст математичного забезпечення автоматизованих модулів контролю в системі керування технологічним процесом з'єднання ФКВ. До таких методів та моделей належать метод цифрової фільтрації розподілу випромінювання ФКВ, математична модель технологічного процесу позиціонування ФКВ за поперечно-поздовжніми координатами, метод розрахунку розузгоджень ФКВ, математична модель технологічного процесу позиціонування ФКВ за кутом повороту, метод розрахунку максимального діаметру модового поля ФКВ.

В третьому розділі розглянуто контроль позиціонування, як складову автоматизованої системи керування процесом з'єднання фотонно-кристалічних волокон. Побудована структурна схема взаємодії АСК ТП з етапами ТП зварного з'єднання ФКВ. Для позиціонування фотонно-кристалічних волокон та контролю якості з'єднання запропоновано метод заснований на принципах узгодженої фільтрації та автозгортки, який засновано на отриманні зображення системою PAS, тобто базується на методі фокусування.

За результатами теоретичного обґрунтування та дослідження характеристик точності запропонованого методу розроблено структурну схему

системи керування позиціонуванням фотонно-кристалічних волокон за лінійними координатами. Розроблено функціональну і структурну схеми процесу позиціонування. Проведена перевірка системи на стійкість за АЧХ, ФЧХ і за критерієм Найквіста.

У четвертому розділі досліджено втрати оптичної потужності сигналу в з'єднаннях ФКВ. Для цього було побудовано декілька моделей фотонно-кристалічних волокон з різними параметрами поперечного перетину: змінювалися діаметр серцевини, кількість отворів в оболонці та відстань між ними. Розраховувалися значення втрат в залежності від величини неузгоджень між волокнами. За результатами розрахунків побудовані графіки залежностей втрат потужності сигналу від кутового, поперечного та поздовжнього зсувів.

Досліджено метод визначення осьового положення фотонно-кристалічного волокна за максимальним діаметром модового поля у поперечному перетині ФКВ. Розроблено структурну схему системи керування позиціонуванням фотонно-кристалічних волокон за кутом повороту навколо поздовжньої осі.

В п'ятому розділі проведені експериментальні дослідження розробленого методу автозгортки при поперечному і поздовжньому освітленні фотонно-кристалічного волокна. В першому випадку виміряно розподіл оптичного поля ФКВ, методом автозгортки визначалися координати центрів одновимірних розподілів інтенсивності поля в кожному поперечному перетині. Таким чином, отримано одновимірний масив з випадковими значеннями розрахованих методом автозгортки центрів перетинів. Щоб отримати інформацію про просторове розташування осі ФКВ побудовано лінію регресії, за якою розраховуються поперечний та поздовжній зсув осей ФКВ, а також кут їх нахилу.

Монографія може бути корисна науковцям, аспірантам, студентам, які займаються питаннями автоматизованого з'єднання оптичних волокон і фахівцям у галузі волоконної оптики.

1 АНАЛІЗ ЗАВДАНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ З'ЄДНАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН

1.1 Компоненти на основі фотонно-кристалічних волокон як об'єкт автоматизації

Фотонно-кристалічні волокна (ФКВ) – це волокна, у яких оболонка представляє собою двовимірний фотонний кристал, сформований симетрично розташованими навкруги серцевини порожніми капілярами у вигляді круглих або шестигранних щільно упакованих діелектричних трубок, що створюють у поперечному перетині періодичну макрорешітку. Період решітки (відстань між центрами трубок D) є близьким до довжини світлових хвиль видимого або інфрачервоного діапазону, що викликає дуже сильну зміну оптичних властивостей фотонних кристалів. Основна особливість ФКВ полягає в тому, що розповсюдження енергії світлової хвилі відбувається уздовж лінійного дефекту, тобто уздовж серцевини волокна, а сама хвиля існує у вигляді поперечної моди TE_{01} або TM_{01} , тобто у поперечному перетині волокна (або у площині решітки фотонного кристалу), а поздовжні моди пригнічуються.

На рис. 1.1 наведено кварцові трубки, які використовують для виробництва ФКВ. Щоб створити періодичну структуру ФКВ використовують технологію укладання кварцових капілярів та їх подальшого перетягування у волокно. Цей процес повторюється декілька разів, тому що вихідні капіляри з діаметром порядку 1 мм повинні бути перетягнуті приблизно до 1 мкм. При цьому центральний канал може бути як кварцовим стержнем (ФКВ на основі ефективного показника заломлення), так і повітряною діркою (ФКВ з забороненою зоною). В поперечному перетині волокна мають гексагональну форму, що визначається структурою укладання капілярів в трубці.

Існує інший спосіб створювання фотонно-кристалічних волокон. У заготовці з високоякісного кварцу висвердлюються отвори, а потім виконується витягування, як і у попередньому випадку, у декілька прийомів. Такий спосіб більш трудомісткий, але дозволяє створювати волокна з довільним перетином та структурою показника заломлення [74].

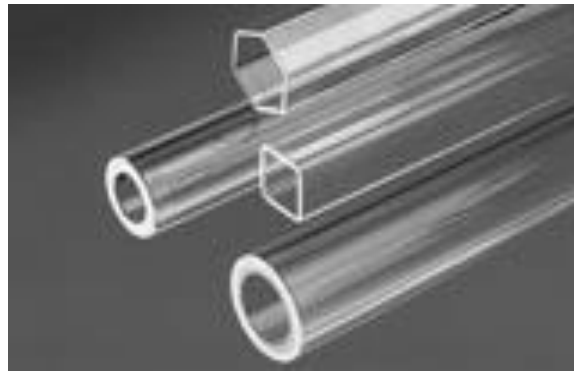


Рисунок 1.1 – Трубки для виготовлення фотонно-кристалічних волокон

Як вже відмічалось, на відмінну від стандартних ОВ в оболонці фотонно-кристалічних волокон є порожнини. Це дозволяє більш ніж на порядок збільшити різницю показників заломлення серцевини й оболонки в порівнянні зі стандартним волокном. Цим в основному і визначаються принципово нові властивості ФКВ, що відрізняє їх від стандартних оптичних волокон. Для порівняння структури стандартного волокна та ФКВ, а також хід світлових промінів в них показані на рис. 1.2 [52, 58]. Деякі характеристики звичайного волокна та ФКВ наведені в табл. 1.1 [75].

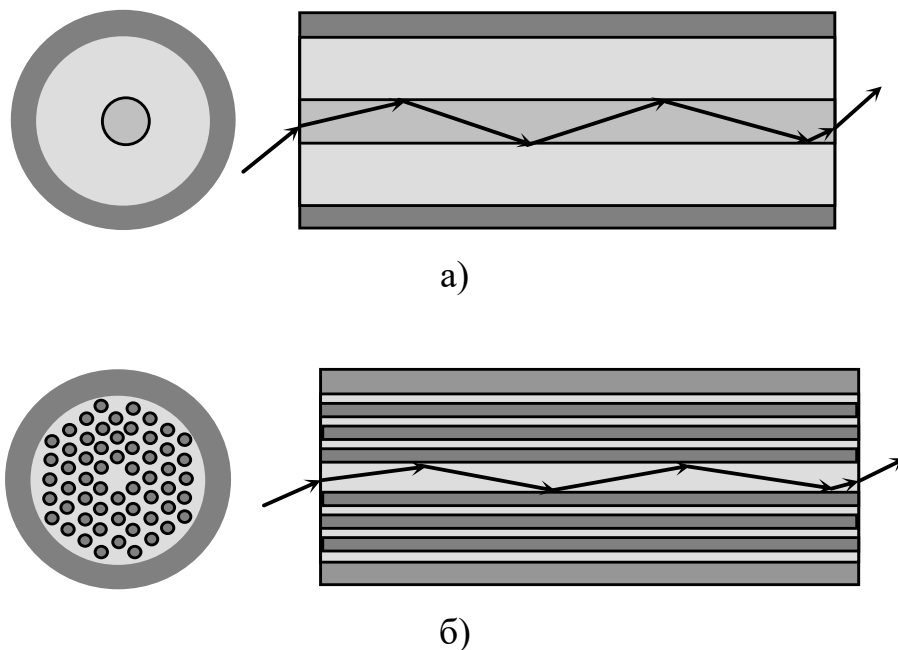


Рисунок 1.2 – Поперечні перетини та хід світлових промінів в стандартному оптоволокну (а) та фотонно-кристалічному волокну (б)

З таблиці видно, що ФКВ можуть мати велику числову апертуру, що полегшує введення випромінювання до них. Нелінійно-оптичні ефекти в ФКВ можуть бути пригнічені або, навпаки, посилені. Втрати в ФКВ, наразі значно перевищують втрати у стандартних волокнах. Це пов'язано з недосконалістю фотонно-кристалічної структури, що викликано складністю технологічного процесу їх виготовлення. Але теоретична границя втрат для ФКВ деяких типів може досягти 0,0005 дБ/км.

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики звичайного ОВ та ФКВ

| Характеристики | Стандартне ОВ | ФКВ |
|--|--------------------------------------|--|
| Числова апертура, NA | 0,06 | >0,6 досягнуто; 0,9 – теоретична границя |
| Діаметр волокна для одномодового режиму, мкм | 7 $\lambda = 1,5$ мкм | >40 $\lambda = 0,3...2$ мкм |
| Площа серцевини, мкм ² | 50 | від 3 до 1000 |
| Нелінійні ефекти | повний набір | відсутні або надто виражені |
| Втрати, дБ/км | 0,2 – близькі до теоретичної границі | 10 – досягнуто; 0,0005 – теоретична границя |

На сьогоднішній день відомі два основних типи волоконних світловодів зі структурою фотонних кристалів [7, 66, 67]. Це волоконні світловоди з кварцовою серцевиною та волоконні світловоди з порожньою серцевиною.

Фотонно-кристалічні волокна з порожньою серцевиною можуть бути одновимірними (так звані брегівські волокна) або двовимірними.

Світловий пучок утримується всередині брегівського волокна за рахунок відбиття від багат шарового діелектричного дзеркала (брегівського дзеркала). Брегівське дзеркало виконано з циліндричних шарів з більшим і меншим показником заломлення, що чергуються (рис. 1.3, а). Такі хвилеводи в циліндричній системі координат є одновимірними об'єктами – їх параметри змінюються тільки уздовж однієї координати.

Двовимірне фотонно-кристалічне волокно з порожньою серцевиною (рис. 1.3, б) може спрямовувати випромінювання видимого і ближнього ІЧ-діапазонів, коли відношення діаметра отворів до періоду їх розташування $d/D \geq 0,3$. В цьому випадку хвилеводний режим забезпечується виключно зонною структурою фотонного кристалу.

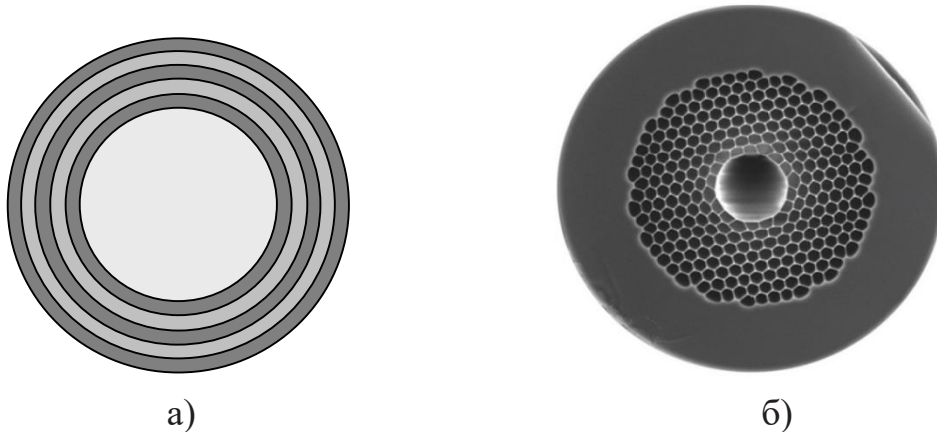


Рисунок 1.3 – Поперечні перетини ФКВ:

а) брегівське волокно; б) ФКВ з порожньою серцевиною

Властивості ФКВ з порожньою серцевиною (втрати, дисперсійні та нелінійні характеристики) вивчені недостатньо. Відомо тільки те, що світло в таких ФКВ, на відміну від стандартних ОВ, розповсюджується переважно порожньою серцевиною, а не кварцом. Здавалося, що втрати в цьому випадку повинні бути дуже низькими, тому що матеріальне поглинання та релєївське розсіювання в повітрі менші в порівнянні з кварцовим склом. Однак експериментально вони виявляються більшими: 13 дБ/км на довжині хвилі $\lambda = 1,5$ мкм. Це пов'язано з тим, що втрати визначаються не розсіюванням і поглинанням, а кінцевою відбивною здатністю періодичної структури оболонки в поперечному напрямку. А вона, в свою чергу, залежить від досконалості періодичної структури, протяжності в радіальному напрямку та чіткому дотриманню умови рівності періоду структури цілому числу півхвиль випромінювання.

Принцип утримання світла в ФКВ з кварцовою серцевиною (рис. 1.4, а) такий самий, як і у звичайного волокна – повне внутрішнє відбиття на границі серцевина-оболонка. Однак управління показником заломлення в них відбувається шляхом створення отворів в кварцовій оболонці, а не шляхом

введення домішок. Причому на відміну від ФКВ з порожньою серцевиною зонна структура в цьому випадку проявляється тільки непрямым чином, а хвилеводні властивості ФКВ з кварцовою серцевиною визначаються в основному ефектом повного внутрішнього відбиття. В цій ситуації необов'язковою являється чітка періодичність розташування повітряних каналів в оболонці, тому що визначним фактором є величина її середнього коефіцієнта заломлення. Кількість спрямованих мод в кварцовій серцевині ФКВ визначається тільки величиною відношення діаметра d повітряних каналів до відстані між їх осями D . При цьому для випадку $d/D \leq 0,2$ дірчаті світловоди являються одномодовими в усьому спектральному діапазоні прозорості кварцу.

Якщо збільшувати розмір повітряних трубок, то контраст показників заломлення серцевини й оболонки швидко росте. Це дозволяє зменшити розмір серцевини, тим самим, збільшити концентрацію потужності світлового випромінювання, а значить, нелінійні властивості волокна. Зокрема, можна зменшити ефективну площу моди до значення 1 мкм^2 на довжині хвилі 1550 нм . Такі волокна характеризуються більшим розміром отворів, тонкими кварцовими перегородками і малим діаметром серцевини (рис. 1.4, б).

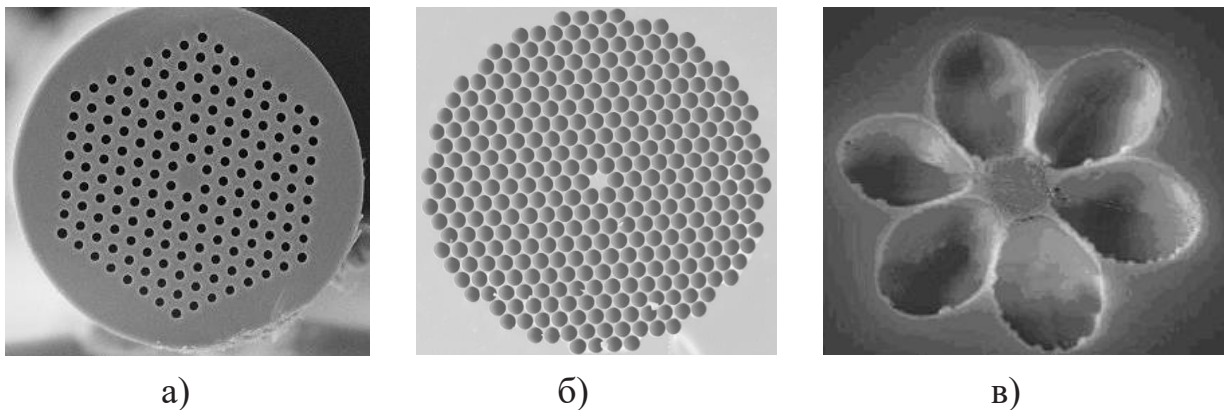


Рисунок 1.4 – Структури фотонно-кристалічних волокон:

- а) ФКВ з кварцовою серцевиною; б) ФКВ з сильною нелінійністю;
- в) ФКВ зі спрощеною структурою

Коли діаметр повітряних трубок збільшується та майже дорівнює відстані між ними, властивості ФКВ подібні властивостям кварцового волокна зовсім без оболонки. Внаслідок високого контрасту показників заломлення поле світлової хвилі проникає за межі серцевини на відстань, меншу діаметра

повітряної трубки. Тому вплив структури волокна поза першого кільця повітряних трубок виявляється незначним. Це сприяло виникненню нового типу волокна, серцевина яких оточена лише одним шаром повітряних трубок, який отримав назву ФКВ зі спрощеною структурою (рис. 1.4, в).

Завдяки сильній концентрації світла в серцевині, властивості ФКВ зі спрощеною структурою мало відрізняються від властивостей ФКВ з великою кількістю отворів. В фотонно-кристалічному волокні, яке містить всього одне кільце повітряних трубок, оточуючих серцевину, можна отримати сполучення сильної нелінійності і малої дисперсії в певному діапазоні довжин хвиль. ФКВ з малою площею серцевини та великими отворами дозволяють отримати нелінійні ефекти в волокнах малої довжини. Ефективний параметр γ_{nl} , який характеризує нелінійність, досягає величини порядку $60 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$, що в 60 разів більше, ніж в стандартному волокні.

Крім того, високий контраст показників заломлення забезпечує велике значення хвилеводної дисперсії, яка може бути використана для компенсації матеріальної дисперсії кварцу. Це дозволяє змістити довжину хвилі нульової дисперсії λ_0 в будь-яку точку спектра, зокрема в область видимого світла, що є цікавим для реалізації генерації спектрального суперконтинууму.

Разом з тим, ФКВ з серцевиною малого діаметра дуже чутливі до незначних змін їх структури. Виготовлення же волокон із заданим розміром повітряних трубок досі є складною задачею. В якості рішення було запропоновано замість кварцового волокна з повітряними отворами використовувати ФКВ, які створені двома різними видами скла, показники заломлення яких значно відрізняються один від одного ($n_1 = 1,76; n_2 = 1,53$ на довжині хвилі 1550 нм). Таке волокно з «твердими дірками» («Solid Holey» Fiber, SOHO), має рекордне значення нелінійного коефіцієнту $\gamma_{nl} = 230 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$ та втрати 5 дБ/км на довжині хвилі 1550 нм .

Сумуючи все сказане, можна запропонувати класифікацію ФКВ в залежності від принципу розповсюдження світла, наведену на рис. 1.5.

В залежності від типу ФКВ, варіюючи діаметри отворів в оболонці та їх взаємне розташування, можна створювати різні спеціалізовані пасивні та активні елементи функціональної електроніки на основі фотонно-кристалічних волокон.



Рисунок 1.5 – Класифікація ФКВ

ФКВ з великим діаметром сердцевини можуть використовуватися в якості середі передачі світлових потоків високої інтенсивності. В ФКВ з малими розмірами сердцевини зменшені пороги всіх нелінійних ефектів, що викликає великий інтерес для створення ефективних раманівських лазерів, підсилювачів, оптичних перемикачів, а також генераторів суперконтинууму – джерела білого світла з дуже високою енергетичною яскравістю. Такі джерела можуть застосовуватися в системах DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Спектральна ширина випромінювання суперконтинууму при певних умовах може скласти декілька октав [6].

Крім цього незвичайними є дисперсійні властивості ФКВ, які залежать від розмірів повітряних каналів та їх взаємного розташування. Ці волокна можуть мати аномальну дисперсію в значно більш короткохвильовій області спектра, ніж звичайні волоконні світловоди, майже до довжин хвиль $\lambda \leq 0,8 \mu\text{м}$. Абсолютна величина дисперсії в фотонно-кристалічних волокнах може на порядок перевищувати значення дисперсії в стандартних одномодових волокнах та досягати $2000 \text{ пс}/(\text{нм}\cdot\text{км})$, а залежність дисперсії від довжини хвилі в широкому спектральному діапазоні може бути дуже слабкою. Стандартне одномодове волокно має нульову дисперсію на довжині хвилі 1310 нм . Таким чином, в області використання DWDM-систем воно має значний рівень дисперсії. Для ефективної передачі даних за сучасними швидкостями передачі ($2,5 \text{ Гбіт}/\text{с}$ на канал і більше) та кількості каналів (40...80 і більше) в частотному інтервалі DWDM необхідно ретельно управляти ефектом хроматичної дисперсії. Для цього використовуються блоки компенсації дисперсії (DCU).

Завдяки своїм унікальним дисперсійним властивостям, ФКВ вже знаходять своє застосування в якості компенсаторів дисперсії в волоконних системах зв'язку.

Управління дисперсією хвильових мод дозволяє вирішити проблему фазового узгодження для процесів чвертьхвильової взаємодії. Фотонно-кристалічні волокна у зв'язку з цим використовуються не тільки як джерела ширококутового випромінювання, а також як перетворювачі частоти лазерних імпульсів. Розмір серцевини являється ключовим параметром, який визначає дисперсійні властивості хвильових мод у подібних структурах [43, 59]. Завдяки цьому мікроструктурно-інтегровані системи субмікрометрових кварцових ниток дозволяє реалізувати мультиплексне перетворення частоти лазерних імпульсів, в тому числі лазерних імпульсів нано- і субнаноДжоулевих рівнів енергії [6].

Під час застосування та монтажу елементів функціональної електроніки на ФКВ виникає необхідність виконання їх з'єднання одне з одним або зі стандартним оптичним волокном. Внаслідок комутації ФКВ з іншими оптичними компонентами відбувається деформація серцевини та повітряних каналів, а також змінюється відстань між отворами в точці контакту, що може викликати неприпустимі втрати сигналу та викликати зміну дисперсії. Тому важливою задачею під час монтажу фотонно-кристалічних волокон являється контроль оптико-геометричних параметрів в процесі з'єднання ФКВ. Далі розглянуто технологічні процеси з'єднань оптичних волокон та проаналізовано фактори, які впливають на якість передачі оптичного сигналу.

1.2 Технологічні процеси з'єднань фотонно-кристалічних волокон

На сьогоднішній день залишається багато не вирішених питань в області застосування фотонно-кристалічних волокон, в тому числі й питання з'єднання таких волокон та елементів на їх основі. З'єднання стандартних оптичних волокон можуть виконуватися роз'ємними або нероз'ємними. Фотонно-кристалічне волокно внаслідок своєї складної структури має відмінний від стандартного волокна механізм передачі сигналу та властиві тільки йому оптико-геометричні параметри. Внаслідок цього використання для фотонно-кристалічних волокон технологій та методів, які використовуються для

з'єднання стандартних ОВ викликає певні труднощі. Тому необхідно розробити новий підхід до процесу з'єднання фотонно-кристалічних волокон з урахуванням їх специфічної структури. Дослідженням проблем, пов'язаних зі з'єднаннями ФКВ інтенсивно займаються декілька наукових груп у світі. В цьому підрозділі представлений короткий огляд технологічних процесів роз'ємних і нероз'ємних з'єднань оптичних волокон, визначені складності використання даних технологій для ФКВ, проаналізовані дослідження, які проводилися на протязі останніх років стосовно проблем в даній області.

1.2.1 Процеси виконання роз'ємного з'єднання фотонно-кристалічних волокон

Найбільш простим можна вважати процес механічного роз'ємного з'єднання волокон. Роз'ємні з'єднання виконуються за допомогою оптичних з'єднувачів (конекторів). На теперішній час номенклатура роз'ємних оптичних з'єднувачів охоплює декілька десятків можливих варіантів конструкцій, які використовуються для з'єднання стандартних оптичних волокон [76]. На рис. 1.6 подано декілька типів конекторів. Різниця в основному полягає в зовнішніх корпусах, габаритних і з'єднувальних особливостях. Основний елемент будь-якого роз'ємного з'єднувача – оптичний наконечник, що представляє собою циліндричний елемент, всередині якого шляхом полімеризації клейових композицій під дією температури або оптичного випромінювання певної довжини хвилі закріплюється оптичне волокно, майже однаковий для усіх типів.



Рисунок 1.6 – Різновиди оптичних з'єднувачів (LC, MTRJ, MTP, FC, ST, SC)

Найбільшого поширення в системах загального користування отримали керамічні наконечники, тоді як в системах спеціального призначення – металеві. У загальному випадку, конектори можна класифікувати наступним чином (рис. 1.7).

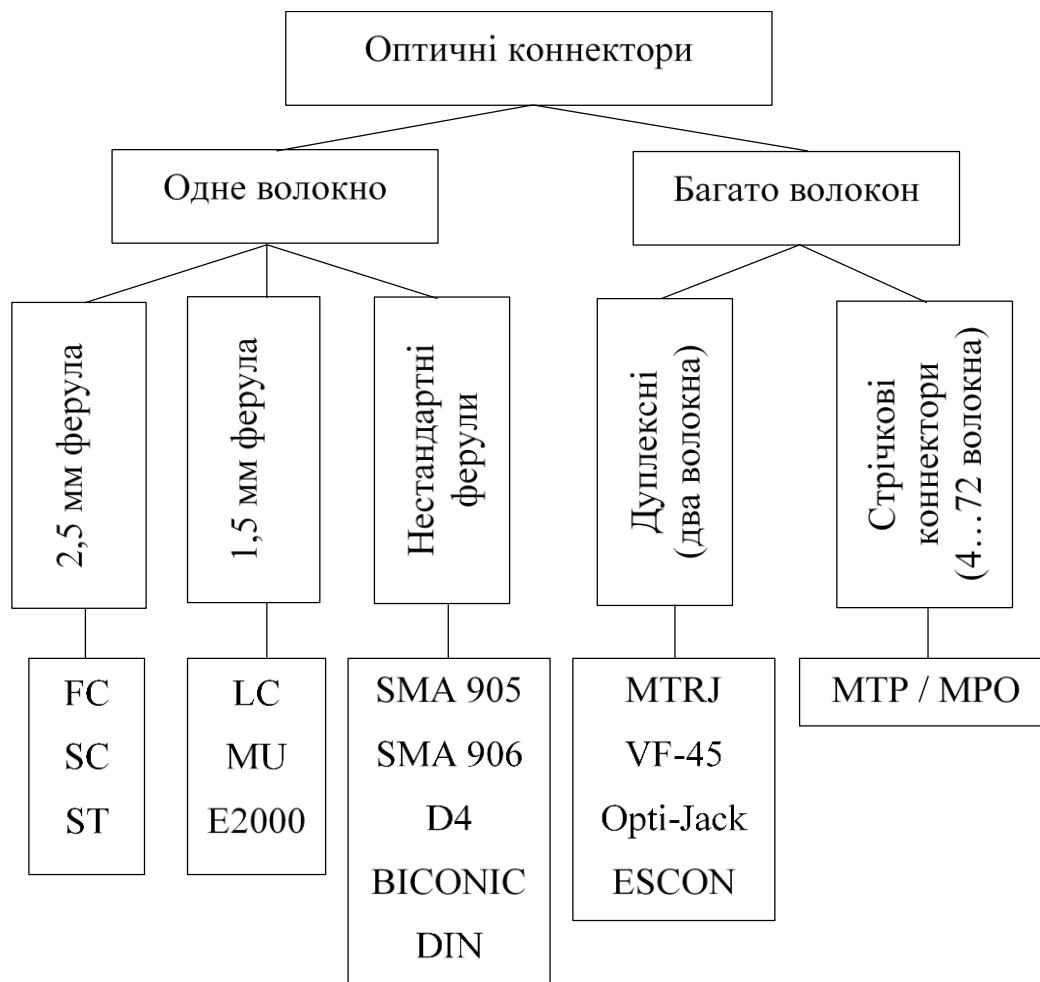


Рисунок 1.7 – Класифікація оптичних конекторів

Призначення оптичного з'єднувача – точне юстування та фіксація серцевин волокон для передачі оптичного сигналу з одного волокна в інше з мінімальними втратами, а також захист волокна від механічних та кліматичних впливів. Для цього оптичні з'єднувачі повинні відповідати наступним вимогам:

- мінімальне внесене затухання;
- мінімальне зворотне відбиття сигналу;
- мінімальні габарити, маса та при цьому мати високу міцність;

- багатогодинна робота без погіршення параметрів (надійність та термін служби);
- простота встановлення на волокно;
- висока температурна стабільність внесених втрат;
- задана повторюваність внесених втрат у наступних циклах з'єднань;
- простота встановлення.

Якість роз'ємного з'єднання суттєво залежить від побудови технологічних процесів обробки, збирання і контролю всіх елементів конектора. Типова схема технологічного процесу монтажу і збирання оптичних конекторів наведена на рис. 1.8.

У виробництві роз'ємних оптичних з'єднувачів використовуються технологічні процеси з широким залученням людини-оператора і слабким рівнем автоматизації.

Контрольно-вимірювальна апаратура для виробничого оперативного контролю і вихідного контролю якості продукції отримала найменший розвиток. Так позиціонування серцевини щодо базової поверхні є механізованим, тому що регулювання обробляючого інструменту здійснюється оператором за зображенням оптичного волокна, сформованому системою технічного зору (СТЗ) юстувального пристрою. Точності $0,5$ мкм, що досягається при цьому, виявляється недостатньо для забезпечення втрат менше $0,3$ дБ. У зв'язку з цим необхідно виконати автоматизацію технологічних операцій контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон в наконечнику.

Наразі поширена технологія армування оптичних волокон наконечниками роз'ємних з'єднувачів, що не юстуються. Такі наконечники можуть бути керамічними (двоокис цирконію або двоокис алюмінію), з нержавіючої сталі або пластмасовими. Керамічні найбільш розповсюдженні внаслідок своїх високих характеристик і меншою вартістю. Особливість даної технології полягає в тому, що для окінцовування необхідно здійснювати підбір наконечників таким чином, щоб отвір був трохи більшого діаметра, ніж волокно.

Армування волокон за даною технологією може виконуватися як на виробництвах, так і під час монтажу волоконно-оптичних систем передачі інформації (ВОСП). У першому випадку для виконання операцій вклеювання волокон, полірування і контролю параметрів можуть використовуватися

стаціонарні засоби контролю. У другому випадку дані операції здійснюються за допомогою простих інструментів і засобів.

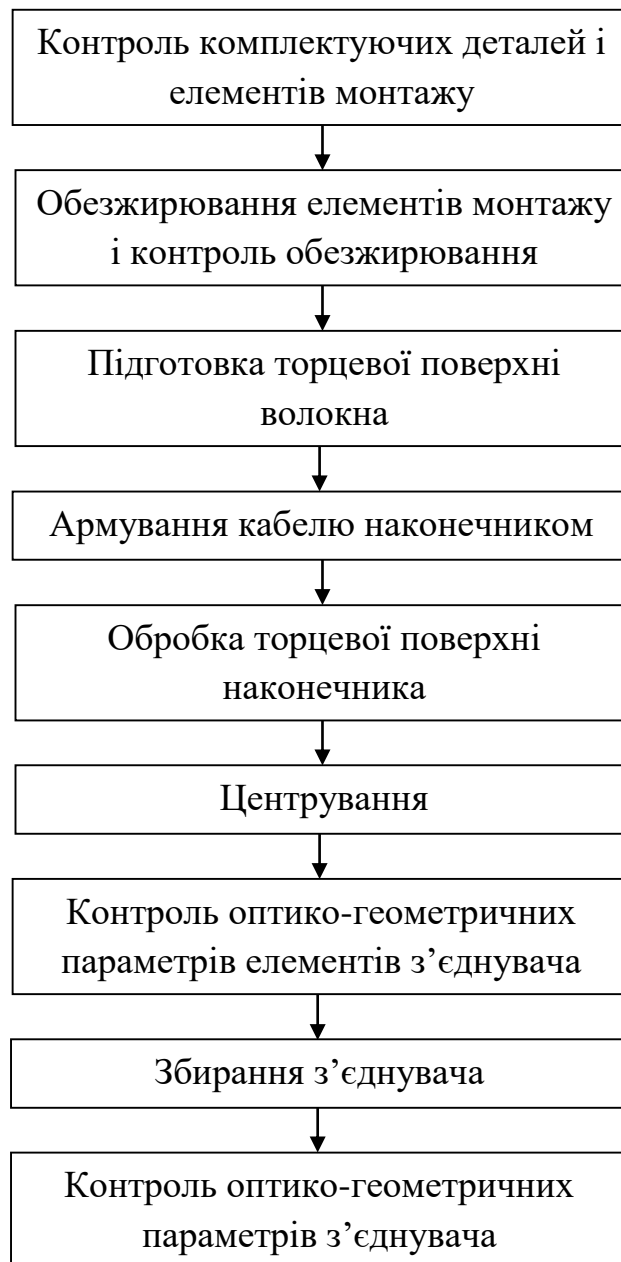


Рисунок 1.8 – Технологічний процес збирання оптичного з'єднувача

Показники якості технології окінцювання наконечниками, що не юстуються, істотно залежать від суб'єктивних факторів. По-перше, неправильний підбір наконечника за внутрішнім діаметром може привести до неприпустимих похибок позиціонування волокна а, отже, великого рівня втрат. По-друге, контроль співвісності і якості поверхні також здійснюється

оператором шляхом візуального контролю за допомогою мікроскопа, що також не гарантує високої точності, достовірності та об'єктивності контролю. Дані особливості також обумовлюють необхідність розробки автоматизованих засобів контролю результатів технологічного процесу.

Зважаючи на високу вартість спеціалізованих автоматизованих засобів контролю зарубіжного виробництва, частіше використовуються універсальні вимірювальні засоби – оптичні мікроскопи і мікроінтерферометри (наприклад, МП-4), промислові системи технічного зору (СТЗ), прилади вимірювання лінійних розмірів, оптичні вимірювальні стенди початкового рівня автоматизації (наприклад, ДПП-1). При цьому є потреба в участі людини-оператора в процесі проведення контролю та інтерпретації його результатів.

Швидкий розвиток і розширення використання фотонно-кристалічних волокон у волоконно-оптичних системах передачі інформації, їх специфічні особливості і широка номенклатура вимагають створення автоматизованих виробництв, здатних виготовляти вироби невеликими партіями з продуктивністю, якістю та собівартістю, притаманними автоматизованому великосерійному виробництву.

Ці завдання можуть бути вирішені створенням гнучких виробничих систем (ГВС), на основі програмованого обладнання з використанням нової технології і сучасної організації праці. Такі системи характеризуються можливістю переналаштування шляхом централізованої автоматичної зміни керуючих програм, завдяки чому може бути забезпечена висока економічна ефективність виготовлення волоконно-оптичних компонентів в умовах дрібносерійного виробництва.

Склад і структура ГВС визначаються змістом виробничого процесу, який формується на основі конструктивно-технологічних параметрів виробів, що виготовляються, їх річної програми, яка визначає темп випуску, з урахуванням типу та характеристик технологічного обладнання, організації взаємодії технологічної, транспортно-накопичувальної, складської підсистем ГВС, а також підсистем підготовки інструментів і обладнання, контролю якості продукції, інформаційно-керуючої і допоміжної, що забезпечують необхідний темп випуску.

Крім зазначених параметрів, в процесі з'єднання фотонно-кристалічних волокон пред'являються також більш високі вимоги до очищення торців ФКВ

від забруднень. Це пов'язано з тим, що через свою структуру фотонно-кристалічні волокна більш схильні до утворення тріщин і відколів, а це скорочує термін служби з'єднувача. Використання з'єднувача для ФКВ вимагає сухого полірування з герметизацією волокна й ефективного вакуумного очищення. Процес видалення часток пилу з повітряних отворів і з порожньої серцевини дуже складний, отже, вся робота над торцями ФКВ вимагає особливої ретельності та чистоти.

Параметри оптичних з'єднувачів обумовлені похибками позиціонування та відхиленнями форми оптичних поверхонь. Крім внесеного затухання важливим параметром в таких з'єднаннях є зворотне відбиття.

По-перше, розсіяний і відбитий сигнал вносить вклад у втрати сигналу, що проходить. Ця складова втрат може досягати значних величин. Наприклад, френелівське відбиття на границі волокно-повітря призводить до відбиття 4% сигналу. По-друге, ця складова втрат вкрай нестабільна і залежить від зовнішнього впливу та змінюється з часом, що може призвести до нестійкої роботи. Щоб усунути відбиття від границі скло-повітря на торцях волокон при механічному з'єднанні застосовують імерсійну рідину з відповідним показником заломлення. Але під час з'єднання фотонно-кристалічних волокон рідина буде проникати в волокно (рис. 1.9, а), що призведе до відбиття сигналу та, як наслідок, до великих втрат. Тому, щоб з'єднати ФКВ застосовують тонкий шар дуже в'язкого гелю або м'якого полімеру приблизно 1 мкм товщиною тільки на торцях волокон (рис. 1.9, б) [77].

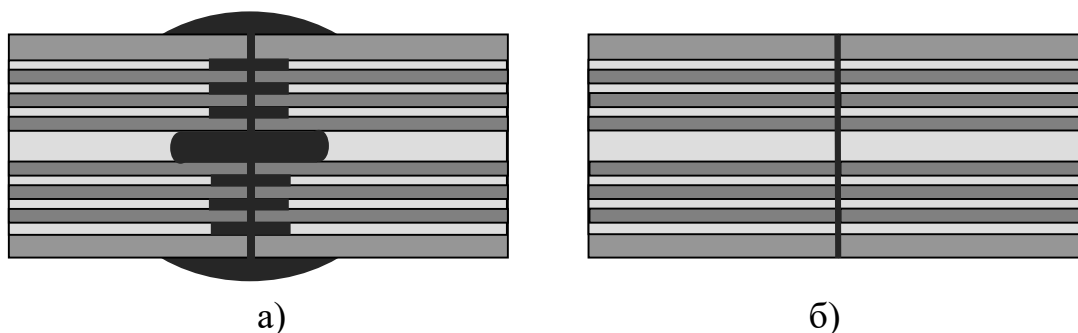


Рисунок 1.9 – Використання гелю з відповідним показником заломлення для з'єднання ФКВ з повітряною серцевиною:

- а) велика кількість гелю, відбувається затікання в ФКВ;
- б) помірне застосування гелю на торцях волокон

З тієї ж причини з'єднувачі, що потребують для очищення або для видалення захисного покриття волокна розчинників, не допускаються, тому що рідина легко проникає в повітряні отвори в оболонці, а у випадку порожнього ФКВ і в серцевину, що також призводить до втрат оптичного сигналу.

1.2.2 Процеси зварювання фотонно-кристалічних волокон

Найбільш високі вимоги за внесеними втратами, механічними характеристиками та надійності забезпечує зварювання волокон. Щоб забезпечити якісний процес зварювання потрібно прецизійне суміщення кінців волокон і дотримання стабільних параметрів електричної дуги. Крім того, як і у випадку роз'ємного з'єднання, необхідно забезпечити рівні та перпендикулярні торці волокон.

За ступенем автоматизації процесу зварювання, способу юстування волокон, якості з'єднань пристрої для зварювання відповідно до «Технічних вимог до пристроїв для зварювання оптичних волокон» поділяються на три групи. До першої (високого класу) групи відносяться пристрої, що забезпечують:

- повністю автоматичний процес зварювання після встановлення волокон в пристрій;
- юстування стандартних волокон за серцевиною (за максимумом сигналу) за допомогою системи LID (локальна інжекція і детектування) або системи PAS (системи узгодження профілів);
- оптимізацію режиму зварювання;
- оцінку затухання сигналу на стику.

До другої (середнього класу) групи відносяться пристрої, що забезпечують:

- повністю автоматичний процес зварювання;
- юстування волокон за рахунок прецизійних V-образних канавок або вручну за оболонкою;
- оцінку величини втрат на стику.

До третьої (спрощеного класу) групи належать пристрої, що забезпечують:

- юсування волокон за рахунок прецизійних V-образних канавок або вручну за оболонкою;
- ручне переміщення волокон уздовж осі для встановлення у вихідне положення на початку зварювання;
- автоматичне зведення та зварювання.

Для зварювання найбільший вплив мають наступні параметри волокон: густина, коефіцієнт теплового розширення, показник заломлення, в'язкість та механічні характеристики. Ці параметри визначають оптичні втрати в місцях стику і повинні братися до уваги при використанні оптичних волокон, зроблених за різними технологіями, насамперед ФКВ і стандартного волокна.

Процес зварювання ФКВ ускладнюється з таких причин:

- схильність ФКВ до руйнування при нагріванні;
- розкладання, випаровування або дифузія матеріалів, відмінних від основного кварцу;
- забруднення повітряних отворів під час підготовки торців ФКВ до зварювання.

Ці недоліки можуть бути зменшені, якщо використовувати певні режими зварювання, наприклад, зменшити зону нагріву та час впливу, що досягається:

- застосуванням пристрою зварювання з дуже маленьким інтервалом електродів або лазерної системи;
- використанням зварювання тертям – кінці волокон вібрують, під впливом ультразвукової частоти і притискаються одне до одного. Висока температура зосереджена тільки в зоні контакту.

У роботі [18] з'єднання двох ФКВ та ФКВ і звичайного одномодового волокна проводили за допомогою зварювання електричною дугою. Зварювання ФКВ та стандартного одномодового волокна проводилося за допомогою пристрою зварювання Sumitomo Electric T36. Величина втрат на стику ФКВ та стандартного одномодового волокна за тривалістю дугового розряду 0,4 с і 0,45 с досягли 0,7...1,1 дБ. Зі збільшенням тривалості дугового розряду до 0,5 с значення втрат на стику значно збільшується в межах 1,5...2,5 дБ.

Збільшення втрат на стику пов'язано з виникненням області стиснення отворів (колапсу) зі збільшенням тривалості дугового розряду (рис. 1.10).

Для зварювання двох ФКВ використовувався пристрій для зварювання Ericksson FSU 925 PM-A. Цей пристрій дозволяє обертати волокна навколо центральної осі для кращого вирівнювання.

Процедура з'єднання була наступною. У першому випадку сплавний час дорівнював 100 мс, сплавний електричний струм – 5 мА, у другому випадку сплавний час – 1 с, сплавний електричний струм – 11 мА. При цьому спостерігався дуже великий розкид значень втрат на стику ФКВ – від 0,08 дБ до 3 дБ. Це вказує на те, що процес зварювання двох ФКВ дуже чутливий до різних факторів процесу зварювання. Втрати виявилися значно більші ніж для з'єднання стандартного волокна з ФКВ.

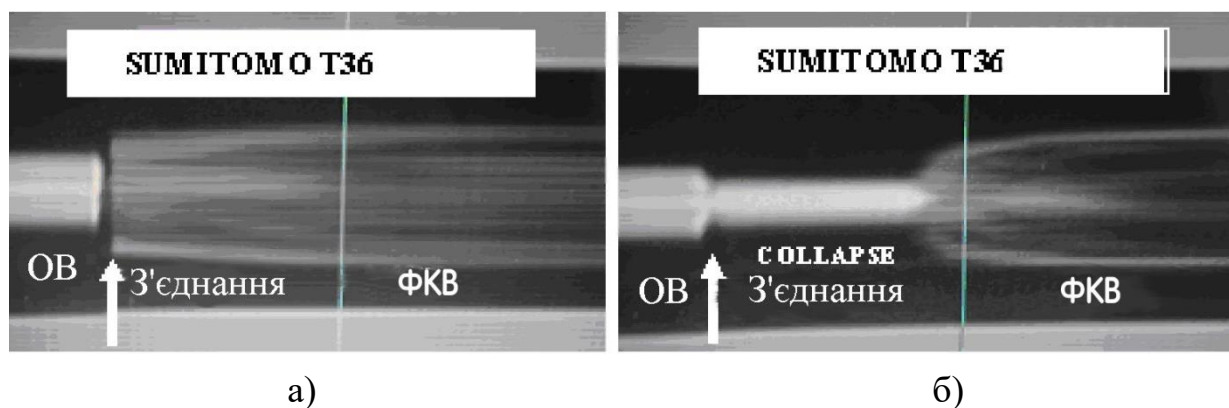


Рисунок 1.10 – З'єднання ФКВ та одномодового волокна:

- а) без колапсу (тривалість дугового розряду 0,4 с);
- б) з'єднання з колапсом (тривалість розряду – 0,5 с)

Залежність втрат на з'єднанні від структури ФКВ та засобу контролю втрат було поетапно досліджено у [19]. Для процесу зварювання були обрані два порожніх ФКВ з різними геометричними характеристиками. У першого ФКВ (НС-1550-02) діаметр серцевини 10,9 мкм і перекриття мод зі східчастим одномодовим ОВ > 90%. У другого ФКВ (НС 19-1550-01) діаметр серцевини 20 мкм. Основні дані про волокна наведені у табл. 1.2.

Процес зварювання виконувався пристроєм для зварювання електричною дугою Ericsson FSU-995. Втрати на стику визначені безпосередньо вимірюванням потужності лазерного випромінювання на частоті 1534 нм.

Таблиця 1.2 – Параметри волокон на довжині хвилі 1550 нм

| Найменування волокна | Діаметр серцевини, мкм | Діаметр модового поля, мкм | Числова апертура | Відстань між отворами оболонки, мкм |
|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------|--|
| НС-1550-02 | 10,9 | 7,5 | 0,12 | 3,8 |
| НС 19-1550-01 | 20 | 13 | 0,13 | 3,9 |
| SMF-28e | 8,2 | 10,4 | 0,14 | - |

Експериментальні результати вимірювань втрат наведені в табл. 1.3. Унікальна особливість обох з'єднань – не взаємність втрат на стику. Тобто, втрати на стику при вимірюванні потужності сигналу, який проходить зі стандартного ОВ у ФКВ відрізняються від величини втрат при проходженні сигналу у зворотному напрямку – з ФКВ в ОВ.

Таблиця 1.3 – Втрати оптичного сигналу на з'єднаннях ФКВ та звичайного ОВ

| Тип з'єднання | Діаметр серцевини ФКВ, мкм | Втрати ОВ/ФКВ, дБ | Втрати ФКВ/ОВ, дБ |
|------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| SMF-28e /НС-1550-02 | 10,9 | 1,5 – 2,0 | 2,6 – 3,0 |
| SMF-28e /НС 19-1550-01 | 20 | 0,3 – 0,5 | >20 |

В дослідженнях [20] та [21] розглянуто проблему, яка виникає під час процесу зварювання ФКВ між собою або зі стандартними ОВ на звичайному обладнанні електричною дугою. З'єднання двох волокон, які мають різні температури плавлення і коефіцієнти теплового розширення є складною задачею. Виявлено, що при нагріванні виникають ущільнення кварцового скла та з'являються пухирі у повітряних капілярах оболонки ФКВ.

На рис. 1.11 показаний ріст пухиря у процесі з'єднання волокон. Формування пухиря відбувається головним чином через рідину, яка утворилася в повітряних отворах оболонки. Причиною цього може бути як рідина, якою відбувалося очищення ФКВ, так і утворений в повітряних отворах конденсат.

Позбавитися рідини в отворах не просто, особливо, якщо вона утворилася далеко від кінця волокна.

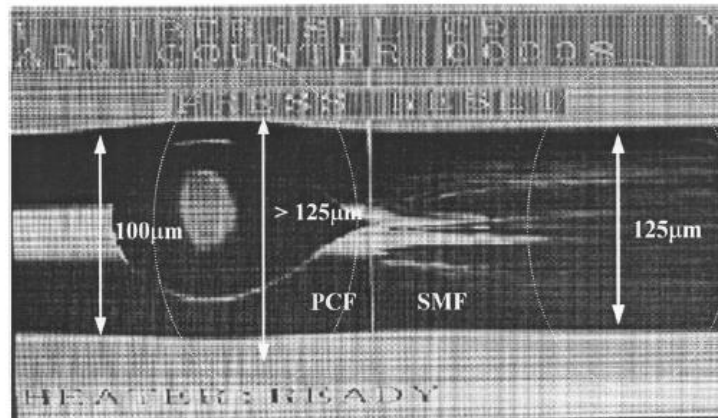


Рисунок 1.11 – Ріст пухиря у процесі зварювання електричною дугою

Для вирішення даної проблеми запропоновано використовувати модифікований CO₂ лазер, який призначено для стандартних ОВ.

Перед з'єднанням CO₂ лазером, виконується стандартна процедура сколювання і очищення. Залишки конденсату в капілярах ФКВ показано на рис. 1.12. Щоб видалити конденсат, протягом декількох секунд впливають лазерним променем перпендикулярно до ФКВ. Потужність лазера достатньо велика для очищення повітряних отворів, але замала, щоб розплавити волокно та деформувати його. Одночасно такий нагрів видаляє частки пилу на поверхні волокна.

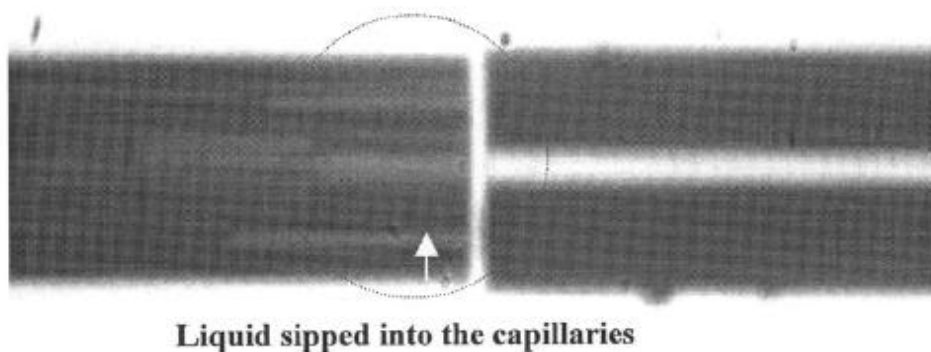


Рисунок 1.12 – Очищення ФКВ призвело до попадання рідини в отвори оболонки

Вирівнювання волокон відбувається за зображеннями, які отримані від двох оптимально розміщених камер, подібно вирівнюванню за профілем. Діаметр ФКВ (100 мкм) менше діаметру стандартного ОВ, тому вирівнювання відбувалося візуально по осях волокон. Якщо осі серцевин вирівняно, після зварювання під дією поверхневого натягу розплавленого кварцу, волокна, що з'єднуються, мають тенденцію до самовирівнювання до певної міри, за умови, якщо потужність плавлення не занадто висока (рис. 1.13).

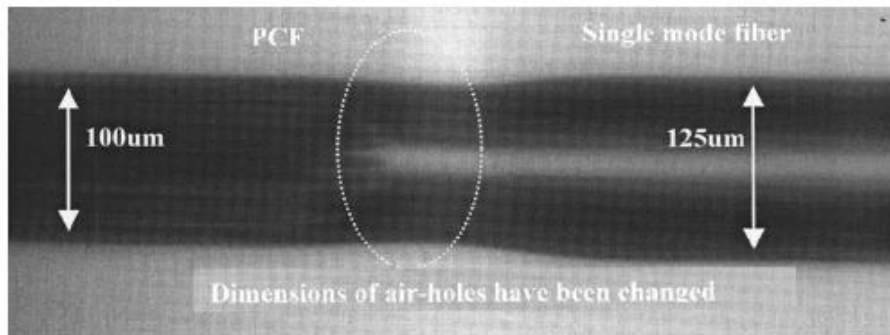


Рисунок 1.13 – З'єднання ФКВ та стандартного ОВ

Через те, що ФКВ має повітряні отвори в оболонці, потужність лазера, яка необхідна для оплавлення ФКВ набагато менше, ніж для стандартного кварцового волокна. В даному експерименті, лазерний промінь розташований ближче до торця стандартного ОВ. В такому випадку потужність лазера для оплавлення ФКВ буде нижче, ніж для ОВ, а значить дію випромінювання когерентного світла зменшено, щоб узгодити різні оптичні властивості цих двох волокон у з'єднанні.

Дослідження показали, що час нагріву для з'єднання ФКВ і стандартного ОВ у п'ять разів менше, ніж потрібно для з'єднання двох стандартних ОВ. У експерименті використовувалося ФКВ з двома шестикутними кільцями з 12 повітряними отворами і декількома проміжними отворами, які оточують область серцевини: $d/D = 0,682$; $D = 12,22 \text{ мкм}$. Діаметр ФКВ 100 мкм, що є трохи меншим діаметру стандартного ОВ.

Експериментально визначене значення втрат у з'єднанні ФКВ зі стандартним волокном складає 1,5 дБ.

На рис. 1.14 представлено інше з'єднання ФКВ з $d/D=0,388$ та $D=8,5\text{ мкм}$ і стандартного кварцового волокна. Тут ОВ, яке має діаметр серцевини 9 мкм було з'єднане з ФКВ, модове поле якого має великий діаметр (радіус серцевини дорівнює $11,57\text{ мкм}$). Діаметри обох волокон майже однакові. Отримані втрати на стику лежать у діапазоні $0,6...0,9\text{ дБ}$, якщо знехтувати неузгодженістю модових полів.

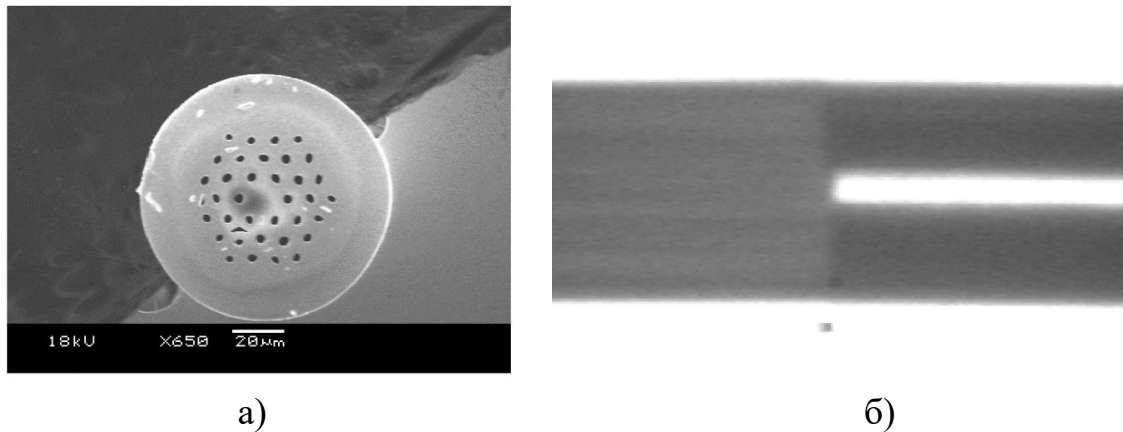


Рисунок 1.14 – Зображення поперечного перетину ФКВ з $d/D = 0,388$ та $D = 8,5\text{ мкм}$ (а); зображення місця з'єднання ФКВ і ОВ (б)

У з'єднанні двох стандартних волокон самовирівнювання відрегульовано за рахунок подібних профілів показника заломлення серцевини й оболонки. Під час з'єднання ОВ і ФКВ може мати місце бічний зсув внаслідок невідповідності профілів показників заломлення. Приймаючи до уваги незначний бічний зсув, оптимальні втрати внаслідок невідповідності модового поля ФКВ та стандартного ОВ склали $0,278\text{ дБ}$.

У роботі [22] авторами проведений експеримент зі з'єднання порожнього ФКВ з діаметром оболонки 125 мкм та стандартного ОВ (рис. 1.15). При цьому використовувалося звичайне обладнання, яке призначено для зварювання стандартних ОВ. У результаті отримано втрати на стику $0,5\text{ дБ}$.

В ході технологічних процесів виготовлення комутаційних компонентів прагнуть звести до мінімуму вплив факторів, що можуть викликати втрати сигналу. Але в процесі виробництва неминучі деякі відхилення геометричних параметрів ОВ від номінальних. Точність геометричних параметрів ОВ відіграє значну роль як в процесі виконання роз'ємного, так і нероз'ємного з'єднань.

Допустимі відхилення геометричних параметрів ОВ від номінальних не повинні перевищувати значень, наведених у нормативних документах таких міжнародних організацій, як ІТУ-Т і ІЕС.

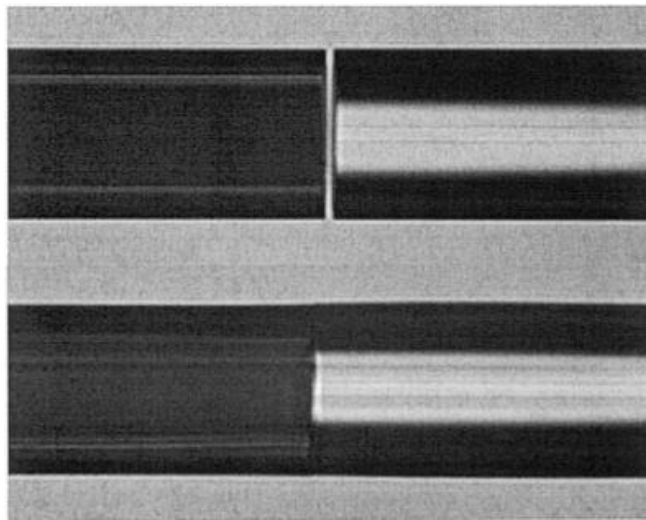


Рисунок 1.15 – З'єднання ФКВ з повітряною серцевиною (ліворуч) та стандартного одномодового волокна (праворуч)

У таблиці 1.4 представлені величини допустимих відхилень параметрів для одномодових (ОМ) і багатомодових (ММ) ОВ.

Таблиця 1.4 – Величини допустимих відхилень геометричних параметрів для одномодових (ОМ) і багатомодових (БМ) оптичних волокон

| Параметр | ІТУ-Т Rec. G651 | ІТУ-Т Rec. G 652 | ІЕС 60793-2 | |
|---|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | БМ | ОМ | БМ | ОМ |
| Діаметр серцевини ОВ | $\pm 6 \%$ | - | $\pm 3 \text{ мкм}$ | - |
| Діаметр поля моди ОВ | - | $\pm 10 \%$ | - | $\pm 10 \%$ |
| Некруглість серцевини ОВ | | - | | - |
| Діаметр оболонки ОВ | | $\pm 2 \text{ мкм}$ | $\pm 3 \%$ | $\pm 3 \text{ мкм}$ |
| Некруглість оболонки ОВ | | | | |
| Неконцентричність серцевини і оболонки ОВ | $\pm 6 \%$ | - | $\pm 6 \%$ | - |
| Неконцентричність поля моди і оболонки ОВ | - | $\pm 1 \text{ мкм}$ | - | - |

1.2.3 Методи контролю оптико-геометричних параметрів оптичних волокон

На сьогоднішній день існують різноманітні методи дослідження і контролю геометричних параметрів волоконних об'єктів: з використанням мікроскопів, тіньові, ближнього поля, поляризаційні, дальнього поля. Всі ці методи відносяться до амплітудних, тобто їх поріг чутливості – мінімальна просторова роздільна здатність відхилень діаметра волокна від заданого номіналу – визначається дозволеною апаратурою мінімумом різниці двох інтенсивностей сигналів, які впливають на оптичне волокно: світлових, емнісних, індукційних та ін. Перехід від амплітудних методів до хвильових зменшує поріг чутливості, тобто зменшує дозволене відхилення геометричних параметрів оптичних волокон, що збільшує точність дослідження та контролю. Такі методи, як дифракційний, інтерференційний і голографічний, дозволяють визначити зміни параметрів волокон, сумірні з довжиною хвилі випромінювання.

Безконтактні методи вимірювання оптико-геометричних параметрів ОВ різноманітні й достатньо прості у реалізації. Існує велика кількість безконтактних оптичних методів, що базуються на різних оптичних явищах. Процес неруйнівного вимірювання волокон складається з трьох етапів: формування опромінюючого пучка, його взаємодія з об'єктом вимірювання і формування зони реєстрації інформаційного сигналу.

Існують методи поздовжнього зондування (при цьому опромінюючий світловий потік проходить через зріз волокна паралельно його осі) і методи поперечного зондування, в яких випромінювання направляється перпендикулярно осі волокна. Класифікація безконтактних методів контролю параметрів оптичних волокон представлена в табл. 1.5 [78].

До методів поздовжнього вимірювання відносяться методи: відбивний, ближнього і дальнього поля, рефракції та інтерферометрії зрізу волокна.

Відбивний метод заснований на вимірюванні інтенсивності світлового потоку, який відбивається від торця волокна під час опромінення його колімованим світловим пучком, паралельно його осі. Інтенсивність випромінювання потрібно вимірювати з високою точністю, тому що

серцевина і оболонка деяких типів волокон відбивають однаково. Роздільна здатність системи вимірювання оптичного поля повинна бути високою. На точність вимірювань впливає також стан поверхні торця, тому практичне використання даного методу для дослідження ФКВ ускладнено, внаслідок складної структури його поперечного перетину.

Таблиця 1.5 – Класифікація безконтактних методів контролю оптичних волокон

| Методи позовжнього зондування | Методи поперечного зондування | | |
|-------------------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|
| | Вузьким пучком і аналізу сигналу в ближній зоні | Широким пучком | |
| | | Аналіз сигналу в ближній зоні | Аналіз сигналу в дальній зоні |
| Відбивний | Фокусування | Інтерферометрії | Дифракційний |
| Ближнього поля | Індукованих диполів | Ліній відсічки | |
| Рефракції у ближній зоні | Рефракційний | Просторової фільтрації | |
| | Прямого розсіювання | Томографічний | |
| Дальнього поля | Зворотного розсіювання | Голографічний | |
| | | Мікроскопічний | |
| Інтерферометрії зрізу волокна | Променевої апроксимації | Проекційний | |
| | | Тіньовий | |

Метод ближнього поля заснований на особливості світла, що проходить через волокно. Потужність сигналу, що передається всіма модами ОВ через дану точку, пропорційна різниці показників заломлення серцевини у цій точці та оболонці за умови рівномірного розподілення потужності випромінювання в межах апертури волокна. Використання некогерентного джерела світла (світлодіоду) впритул притиснутого до

торця ОВ, забезпечує однакове збудження усіх мод. Недоліком методу є неможливість виміряти числову апертуру волокна.

В методі визначення профілю показника заломлення ОВ за рефракцією у ближній зоні, вільному від впливу випливаючих мод, вимірюється потужність випромінювання, яке виходить з серцевини у оболонку. Даний метод іноді застосовують як додатковий до методу ближньої зони, де використовується випромінювання, яке передається серцевиною.

В основу методу дальнього поля покладений зв'язок між розподілом полів по торцю оптичного поля і в дальньому полі. Реєстрація і вимірювання діаграми спрямованості не викликає технічних труднощів, але визначення параметрів ОВ досить ускладнено. В процесі реалізації реєструється діаграма спрямованості після проходження ОВ, яке збуджується світлодіодом. Результатом математичної обробки отриманого розподілення потужності у дальньому полі є не справжній профіль показника заломлення, а еквівалентний профіль у дальньому полі, в якому відсутні осциляції в центральній частині і невеликий викид на осі, пов'язаний з методикою числової обробки. Роздільна здатність даного методу занадто велика для використання у дослідженнях ФКВ і перевищує 1 мкм .

Метод інтерферометрії заснований на дослідженні зрізу волокна, товщиною $0,25 \text{ мм}$ і застосовуються для досліджень заготовок оптичних волокон. Використовувати даний метод для позиціонування ФКВ не доцільно, тому що профіль показника заломлення залежить від перетину, в якому зроблено зріз.

З розглянутих методів дослідження оптичних волокон найбільш відповідає вимогам поставлених задач з ідентифікації центру серцевини ФКВ та визначення форми і розміру модового поля метод ближнього поля поздовжнього зондування.

Методи поперечного зондування за типом опромінюючого пучка можна розділити на два класи: ті, що використовують вузький пучок (порівняно з геометричними розмірами поперечного перетину об'єкта) і ті, що використовують широкий пучок, розмір якого на порядок або більше перевищує діаметр контрольованого об'єкта. Реєстрацію інформаційного

сигналу можна здійснювати у двох областях – ближній або дальній зоні площини зображення.

Метод інтерферометрії за поперечним освітленням полягає в опроміненні ОВ пучком світла під прямим кутом щодо його осі. В результаті формується інтерференційна картина від об'єктного і опорного пучків. Відстань між інтерференційними смугами цієї картини залежить від розподілу показника заломлення. При поперечному освітленні заломлення проміння викликано в першу чергу наявністю зовнішньої границі оболонки. Шкідливий вплив зовнішньої поверхні оболонки усувається зануренням волокна в імерсійну рідину. Застосування методів, які вимагають використання імерсійної рідини, для визначення параметрів з'єднання фотонно-кристалічних волокон не можливе, з тієї причини, що рідина потрапляє в отвори оболонки та в повітряну серцевину, а це може викликати появу пухирів або колапс повітряних каналів в процесі нагрівання та зварювання та призвести до додаткових втрат оптичної потужності.

Сутність голографічного методу полягає в наступному. До того як оптичне волокно поміщується в сигнальний промінь за голограмою спостерігається система смуг рівного нахилу. Внесення ОВ призводить до набігу різниці фаз і, отже, до спотворення смуг інтерференційної картини. Отриману голограму фотографують і, вважаючи ОВ осесиметричною неоднорідністю, за отриманою фотографією голограми обчислюють необхідні параметри. Але обробка результатів вимірювань займає багато часу. Крім цього голографічні вимірювальні системи дуже чутливі до механічних вібрацій, що ускладнює використання цього методу в виробничих умовах.

Сутність методу телевізійної мікроскопії полягає в отриманні оптичними засобами зображення об'єкта на фотокатоді передавальної телевізійної камери і аналізі електронними засобами телевізійного зображення цього об'єкта. Метод телевізійної мікроскопії часто використовується в парі з імерсійно-оптичним. Для вимірювання діаметрів і еліптичності використовується спеціальна оптична система, яка забезпечує отримання на екрані одночасно двох ідентичних зображень досліджуваного об'єкта, їх суміщення, зрушення відносно один одного на необхідну відстань і обертання зображень для їх азимутальної взаємної орієнтації (вимірювання еліптичності). Роздільна здатність установки 0,1 мкм. Такі пристрої є напівавтоматичними, що вимагає велику кількість

ручних операцій. Цим пристроям властиві операторські помилки, обумовлені суб'єктивним вибором меж на зображенні об'єкта.

Тіньовий метод або метод оптичного затемнення використовує ефект зниження інтенсивності випромінювання, яке надходить на фотоприймач під час перекриття його волокном. Волокно опромінюють або паралельним, або розбіжним пучком від точкового джерела. Розмір тіні, утвореної вимірюваним ОВ, направляють на фотоприймач і за розміром тіні визначають діаметр. Похибка методу збільшується зі зменшенням діаметра волокна через дифракцію. Недоліками цього методу є залежність похибки вимірювання від властивостей матеріалу, чистоти і форми поверхні волокна, низька точність вимірювання через наявність напівтіньової зони з переходом границі світлотінь і впливу дифракції світла на об'єкті, обмежений діапазон вимірювання в сторону малих діаметрів об'єктів і необхідності близького розташування фотоприймача до вимірюваного об'єкту.

Принцип вимірювання параметрів ОВ дифракційним методом заснований на опроміненні об'єкта лазерним пучком, перпендикулярним його осі, і формуванні в дальній зоні дифракційної картини з центральним максимумом уздовж осі і бічними пелюстками зі спадаючої від центру інтенсивністю. Для визначення діаметра ОВ вимірюється відстань між двома сусідніми бічними максимумами і розраховується обернено пропорційна йому величина. Недоліками цього методу є складність розрахунків, а також складність апаратної реалізації.

Аналізуючи переваги і недоліки різних методів контролю параметрів ОВ можна зробити висновок, що найбільш прийнятним для досліджень за поперечним зондуванням фотонно-кристалічних волокон є метод фокусування. При використанні даного методу оптико-геометричні параметри зварних з'єднань волокон можна визначити, спостерігаючи розподіл інтенсивності випромінювання, яке фокусується серцевиною, яка діє як циліндрична лінза. Цей метод вимагає опромінення ФКВ широким паралельним пучком під прямим кутом до його осі. Розподіл потоку випромінювання на виході ФКВ вимірюється відеокамерою, і отримані дані обробляються на автоматизованій установці. Геометричні параметри ФКВ вимірюються з відтворюваністю краще 1% і просторовою роздільною здатністю менше 1 мкм, при цьому погрішність його вимірювання складає кілька одиниць п'ятого знаку.

Реалізація методу ближнього поля и методу фокусування для дослідження процесу позиціонування ФКВ при поздовжньому і поперечному зондуванні наведена в наступних розділах даної роботи.

Таким чином, аналізуючи сучасний стан проблеми з'єднання ФКВ, можна зазначити, що більше уваги приділяється дослідженням впливу режимів зварювання на якість з'єднання, а питання контролю юстування таких волокон залишається не достатньо вивченим. Адже крім потужності, температури та тривалості впливу на місце стику ФКВ, якість з'єднання визначається також точністю позиціонування волокон одне відносно іншого (поперечного і поздовжнього зміщення, кутового нахилу тощо). Крім цього потрібно також враховувати розмір та форму модових полів ФКВ. Використання сучасних методів, які розроблені для стандартних ОВ дуже обмежено, а іноді й зовсім не можливо, що пов'язано зі складною структурою ФКВ та труднощами в обробці зображень в процесі позиціонування. Під час виконання з'єднання ФКВ між собою або зі стандартним ОВ дуже важливо точно визначити саме положення осей серцевин волокон, і вже за ними проводити юстування та оцінку внесених втрат у місці стику після з'єднання.

1.3 Технологічні фактори втрат оптичного сигналу в фотонно-кристалічних волокнах та їх з'єднаннях

Завдяки постійному вдосконаленню технологій виготовлення фотонно-кристалічних волокон, значення втрат під час розповсюдження світла в ФКВ наближуються до втрат, які мають місце в стандартних оптичних волокнах.

Можна виділити внутрішні фактори втрат у ФКВ, обумовлені фізико-хімічними явищами в оптичних волокнах, а також викликані відхиленнями конструктивно-технологічних параметрів волокна, і зовнішні, які мають місце під час виконання монтажу (рис. 1.16).

1.3.1 Внутрішні технологічні фактори втрат у ФКВ та їх вплив на процеси з'єднання

До фізико-хімічних факторів втрат належать наступні. По-перше, втрати внаслідок релєївського розсіювання світла в серцевині. Коефіцієнт релєївського

розсіювання в серцевині ФКВ більш ніж в два рази перевищує коефіцієнт релєйського розсіювання чистого кварцу. Причина цього полягає у наявності випадкових неоднорідних напружень, які виникають на границі серцевини в процесі витягування волокна. Тому величина втрат на релєйське розсіювання в ФКВ виявилася в два рази вище величини таких втрат в стандартному одномодовому волокні і складає $0,18 \text{ дБ/км}$.

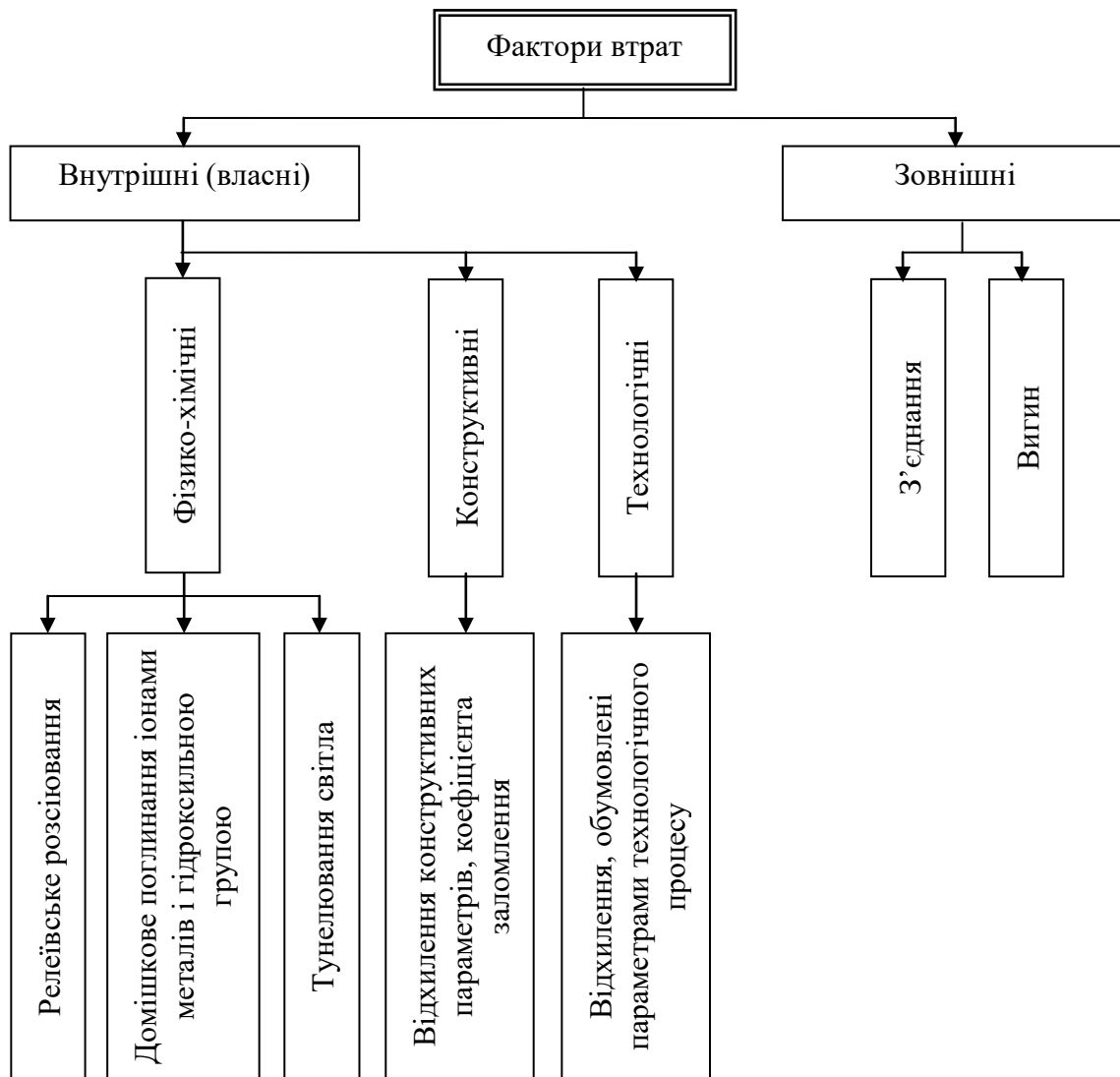


Рисунок 1.16 – Класифікація факторів втрат в ФКВ

По-друге, втрати, які викликані домішковим поглинанням іонами металів і гідроксильною групою, такі ж, як і в стандартних одномодових світловодах. Їх величина складає $0,13 \text{ дБ/км}$.

По-третє, втрати, пов'язані з тунелюванням світла. Дослідження останніх років показали, що деякі типи періодичних структур мають повністю заборонену фотонну зону. У випадку падіння світла з довжиною хвилі, яка знаходиться в забороненій зоні напівбезкінечної періодичної структури з забороненою фотонною зоною, відбувається повне відбиття падаючого світла. Тобто, коефіцієнт відбиття світла з довжиною хвилі з забороненої області від напівбезкінечної ідеальної періодичної структури з ФЗЗ дорівнює 100%.

Але в реальних фотонно-кристалічних волокнах кількість періодичних шарів завжди обмежена. Внаслідок цього відбувається часткове проникнення світла поза границі обмеженої періодичної структури а, значить, часткове витікання світла з волокна. Цей процес називається тунелюванням світла крізь оболонку ФКВ. На рис. 1.17 наведено залежність втрат, пов'язаних з тунелюванням від довжини хвилі для різної кількості періодичних шарів у волокні [11].

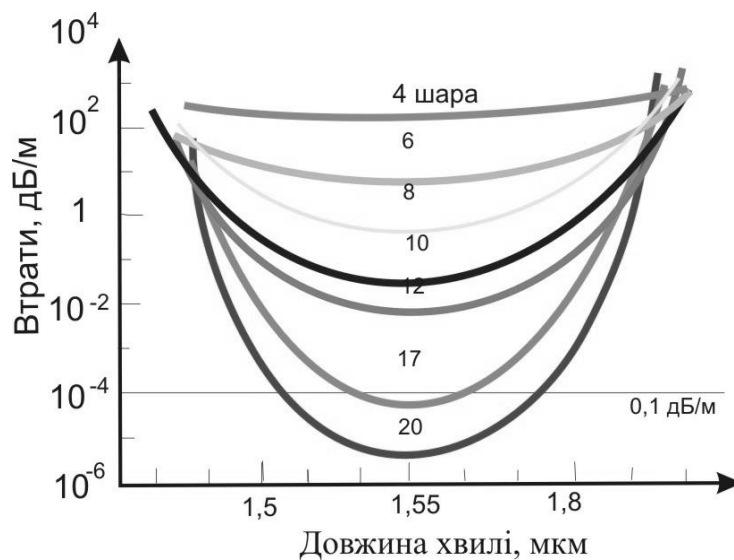


Рисунок 1.17 – Залежність втрат на тунелювання від довжини хвилі для різної кількості періодичних шарів в ФКВ

З рисунку видно, що під час збільшення кількості шарів до 17, втрати, пов'язані з тунелюванням, стають незначними для мод, що розповсюджуються. Втрати мінімальні у центрі забороненої зони та збільшуються по її краях. Необхідно зазначити, що зі збільшенням відношення d/D кількість шарів, необхідних для зменшення втрат до $0,1 \text{ дБ/км}$, знижується. Втрати на тунелювання різні для різних мод.

Втрати TE_{01} моди мінімальні, трохи більші втрати мод зі змішаною поляризацією (до них відноситься й основна мода). Завдяки тому, що різні моди мають різні втрати під час тунелювання, в ФКВ виникає ефект модової фільтрації, який дозволяє використовувати TE_{01} моду для передачі інформації в квазіодномодовому режимі навіть за великих діаметрах серцевини волокна. Встановлено, що втрати на тунелювання для різних мод по-різному залежать від радіуса серцевини.

Для достатньо малих значень радіуса волокна R можна використовувати такі наближені вирази:

$$\alpha_T(TE_{01}) \sim \frac{1}{R^3}; \quad \alpha_T(TM_{01}, EH_{ml}, HE_{ml}) \sim \frac{1}{R}, \quad (1.1)$$

де α_T – парціальний коефіцієнт затухання, пов'язаний з тунелюванням.

Як видно, для усіх мод збільшення радіуса серцевини призводить до зменшення втрат, причому для моди TE втрати зменшуються найбільше. Таким чином, втрати на тунелювання в ФКВ можуть бути знижені до величини, значно менше рівня, характерного для кварцових волокон.

До втрат, викликаних конструктивно-технологічними параметрами можна віднести втрати, які викликані розкидом геометричних параметрів повітряних каналів самих волокон: флуктуаціями їх діаметра і нерегулярністю розташування. Величина їх складає приблизно $0,27$ дБ/км.

Слід зазначити, що в процесі зварювання ФКВ під дією високих температур змінюються розміри, форма та розташування отворів в оболонці, що впливає на розповсюдження світла серцевиною.

1.3.2 Зовнішні технологічні фактори втрат у ФКВ та їх вплив на процеси з'єднання

Зовнішні втрати викликані факторами, які виникають під час монтажу: вигином волокна, а також з'єднанням волокон.

Втрати, викликані вигином волокна, виникають внаслідок перетворення мод розповсюдження і моди випромінювання, тобто моди, для яких не виконуються умови повного внутрішнього відбиття. Іншими словами, змінення

профілю границі серцевина-оболонка може привести до відбиття мод високого порядку під кутами, які не допускають подальшого відбиття. При цьому світло покидає волокно. Мікронеоднорідності границі можуть виникнути і у процесі виробництва волокна.

ФКВ на відмінну від стандартного волокна навіть з великим вигином мають порівняно низькі втрати сигналу. Встановлено, що в розроблених ФКВ діаметром 80 мкм допускається вигин 10 мм без значного збільшення затухання [79]. Розглянемо докладніше фактори, які впливають на втрати оптичного сигналу для випадків роз'ємного та зварного з'єднань ФКВ (див. рис. 1.18).

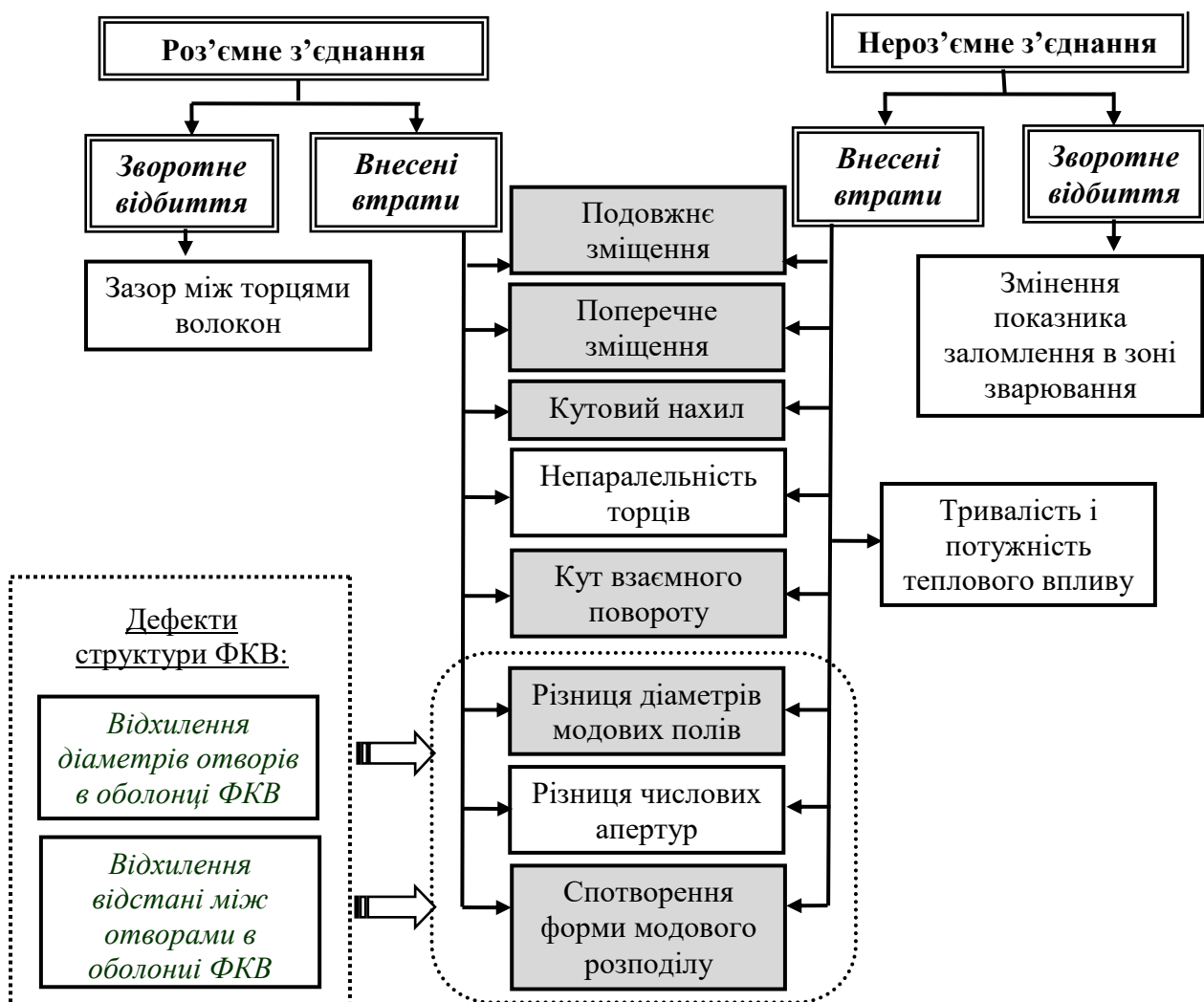


Рисунок 1.18 – Фактори втрат у з'єднаннях ФКВ

На якість зварного з'єднання впливають, насамперед, фактори, які обумовлені рівнем технології – в залежності від якості оптичної системи і

конструкції елементів фіксування зварювального пристрою, неминучим є деякий поперечний зсув та кутовий нахил осей оптичних волокон. Для випадку з'єднання двох фотонно-кристалічних волокон важливим фактором являється кут взаємного повороту волокон один відносно іншого. Особливо це стосується порожніх ФКВ або ФКВ зі спрощеною структурою, у яких регулярність розташування отворів в оболонці має велике значення. Необхідно відзначити фактори, які обумовлені якістю підготовки волокон (зокрема, кутом відколу торців). Торці волокон, що з'єднуються повинні мати високу ступінь гладкості та їх поверхня повинна бути строго перпендикулярна осі волокна [49, 64].

Якість з'єднання залежить також від форми зварного шва, яка, в свою чергу, обумовлена потужністю і тривалістю теплового впливу, зусиллям притискання, якістю позиціонування. Приріст затухання, який залежить від зусилля притиску волокон, тісно пов'язаний з величиною початкової неузгодженості волокон. За великих значеннях початкової неузгодженості коливання величин внесених втрат мають великий розкид. Також важливі такі параметри, як час і температура зварювання. Від них залежать:

- глибина процесів дифузії, яка призводить до змінення показника заломлення шарів в зоні шва, що збільшує зворотне відбиття;
- наявність пухирів та засмічення шва внаслідок випаровування.

В процесі зварювання ФКВ під дією високої температури відбувається деформація повітряних отворів, а також порушується їх просторове розташування в оболонці. Всі ці зміни впливають на характеристики волокна, такі як режим розповсюдження сигналу, дисперсію, затухання оптичної потужності, що виникає внаслідок змінення модового поля та числової апертури. На рис. 1.19 наведено графіки залежності нормалізованої частоти від відстані між повітряними каналами в оболонці для ФКВ з різними значеннями d/D .

Пунктирна лінія відповідає значенню $V_{eff} = 2,405$ [80]. З представлених графіків видно, що кількість спрямованих мод в кварцовій серцевині ФКВ визначається величиною відношення діаметру d повітряних каналів до відстані між їх осями D . При цьому для випадку $d/D \leq 0,2$ ФКВ являється одномодовим в усьому спектральному діапазоні. Тому зі зміненням величин d або D фотонно-кристалічне волокно може з одномодового режиму перейти в багатомодовий, що впливає на якість світловоду як за втратами, так й за смугою пропускання.

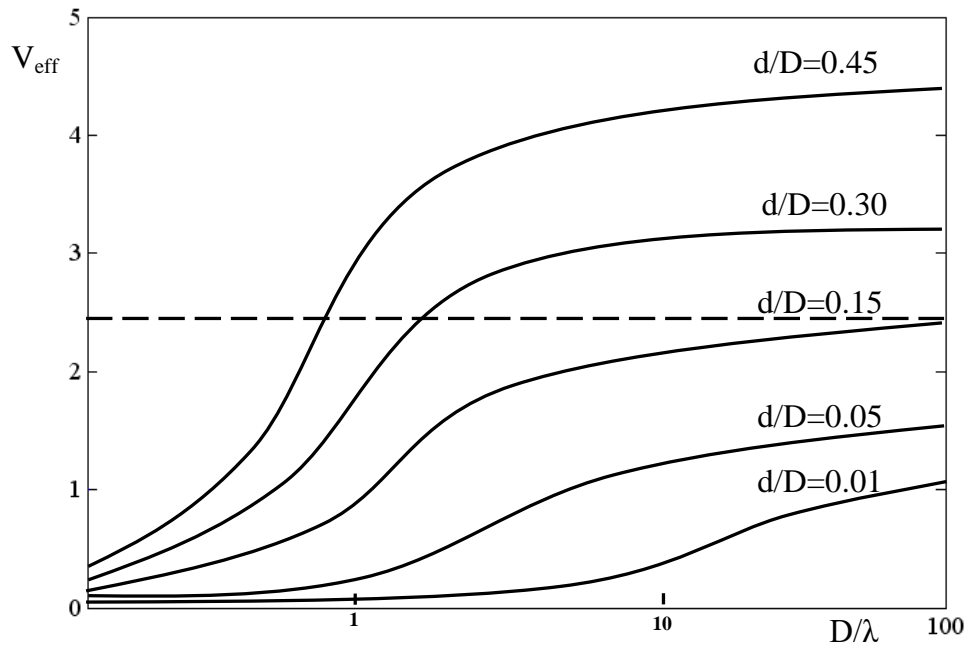


Рисунок 1.19 – Залежність нормалізованої частоти від відстані між отворами в оболонці ФКВ

Крім затухання в волоконно-оптичних системах зв'язку важливим параметром є дисперсія. В ФКВ дисперсію можна визначити як [20, 81]:

$$D_{PCF} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2}, \quad (1.2)$$

де c – швидкість світла в вакуумі;

n_{eff} – ефективний показник заломлення ФКВ;

λ – довжина хвилі.

На рис. 1.20 представлена хроматична дисперсія для трьох ФКВ з однаковими радіусами серцевин – 40 мкм і шагом – 10 мкм, та різними діаметрами повітряних отворів – 1 мкм, 2 мкм і 5 мкм відповідно. Можна побачити, що зі збільшенням діаметра отворів на 1 мкм дисперсія змінюється приблизно до 10 пс/(нм·км) [71].

На якість роз'ємного з'єднання впливає, по-перше, поперечний зсув волокон, що з'єднуються. Проміжок, який утворюється між торцями волокон, що з'єднуються, викликає ефект френелівського відбиття – наслідок різниці показників заломлення волокна та проміжку між волокнами, який, як правило,

повітряний, що призводить до деяких втрат сигналу. Втрати френелівського відбиття присутні як на передаючому, так і на приймаючому торці. Френелівське відбиття значно зменшується в торцевому контакті волокон, що з'єднуються.

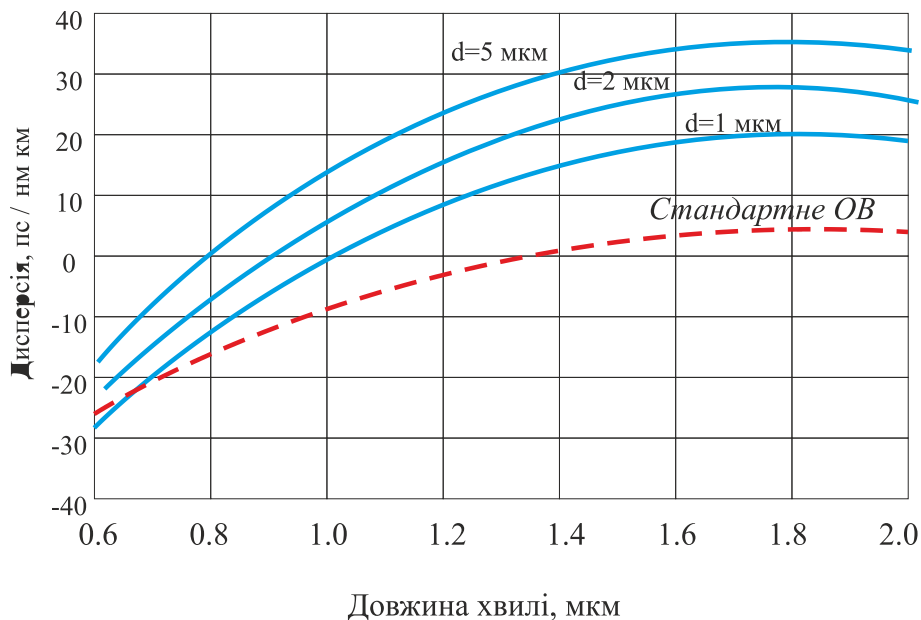


Рисунок 1.20 – Хроматична дисперсія для ФКВ з різними розмірами отворів та з шагом їх розташування рівним 10 мкм

По-друге, втрати при кутовому зміщенні осей волокон, що з'єднуються, які обумовлені взаємодією декількох факторів. Ефект кутового зміщення пов'язаний з осьовим зміщенням впливає на розподіл мод на вихідному торці. Нерівномірний розподіл енергії на користь мод вищого порядку призводить до більш вагомого впливу кутового зміщення на втрати, ніж у випадку рівномірного розподілу енергії між модами. Рівень втрат, пов'язаний з кутовою неузгодженістю орієнтації осей відносно один одного, визначається числовою апертурою волокон. В даному випадку вплив числової апертури протилежний ефекту наявності проміжку між волокнами. Тут більше значення числової апертури допускає більш велику кутову неузгодженість для обмеження втрат на саме тому рівні, що й у випадку меншого значення апертури. Якщо з'єднувач правильно встановити, то кутова неузгодженість практично виключається, так що пов'язані з цим ефектом втрати істотно менше втрат, які пов'язані з поперечним зміщенням.

Ще один фактор втрат – якість обробки торцевої поверхні волокон. Будь-які дефекти на поверхні переривають траєкторію проміння та збільшують втрати в з'єднанні. Для їх зменшення торці оптичних волокон, як правило, полірують. Очевидно, що для зменшення втрат торці волокон повинні бути перпендикулярні осям волокон і паралельні один одному в процесі з'єднання. На практиці втрати в цьому випадку не великі, тому що під час відколювання волокна та поліруванні скла контролюється перпендикулярність поверхні по відношенню до осі волокна.

Відхилення діаметрів отворів та їх розташування в оболонці ФКВ, викликані недосконалістю технології виробництва волокон, призводять до втрат, які обумовлені різницею модових полів та числових апертур. Насамперед втрати потужності сигналу залежать від розмірів серцевин та модових полів волокон, що з'єднуються. Коли діаметр серцевини передавального волокна більше діаметра серцевини волокна, що приймає сигнал, виникають втрати внаслідок того, що частина оптичної потужності розповсюджується оболонкою волокна, що приймає.

Якщо сигнал передається навпаки, з серцевини оптичного волокна меншого діаметру у волокно з більшим діаметром, втрати не виникають. В процесі з'єднання ФКВ потрібно контролювати кут взаємного повороту навколо поздовжньої осі, що проходить через центр модового поля. Це пов'язано з двома факторами: неконцентричністю, тобто відстанню між центрами серцевини і оболонки ФКВ, та некруглістю серцевини і оболонки.

У першому випадку розбіжність центрів серцевин призводить до збільшення втрат в роз'ємних з'єднаннях, а некруглість серцевин і оболонки призводить до того ж ефекту, що і різниця діаметрів модових полів. Найбільші втрати будуть при повороті волокон, що з'єднуються, один відносно іншого на 90° , тобто коли максимальний діаметр орієнтувати з найменшим діаметром. Цей ефект особливо помітний в оптичних з'єднувачах, які не мають направляючих пазів а, отже, значення втрат може змінюватися при кожному повторному підключенні в залежності від положення ФКВ.

Підсумовуючи все сказане, можна зробити висновок, що з'єднання елементів на ФКВ одне з одним або зі стандартним оптичним волокном розширює можливі області їх застосування. З'єднання може бути роз'ємним або нероз'ємним. Частіше нероз'ємне з'єднання оптичних волокон виконується

за допомогою зварювання електричною дугою або лазером, що забезпечує кращі механічні характеристики та більш низькі втрати оптичної потужності сигналу.

Для зварювання стандартних оптичних волокон розроблено цілу низку промислових пристроїв. Але застосування таких пристроїв для зварювання ФКВ викликає певні труднощі. Внаслідок складної періодичної структури оболонки ФКВ, їх теплові характеристики відрізняються від характеристик стандартних оптичних волокон. З'єднання двох волокон з різними тепловими характеристиками є складною задачею, крім того надзвичайно важливо уникнути значного руйнування повітряних отворів оболонки ФКВ під час з'єднання. Звичайно, основними вимогами для з'єднання ФКВ є низькі втрати на стику волокон, що досягається прецизійним позиціонуванням, а також забезпеченням мінімального порушення структури ФКВ.

2 СТРУКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ З'ЄДНАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН

2.1 Математична модель автоматизованого керування процесом з'єднання фотонно-кристалічних волокон

Як зазначалося, існує два способи з'єднання оптичних волокон – зварюванням та за допомогою наконечників-втулок. В обох випадках вирішальним є позиціонування волокон із заданою точністю. Розглянемо процес виконання з'єднання оптичних волокон зварюванням, яке виконується за допомогою спеціальних автоматизованих пристроїв.

На рис. 2.1 наведено узагальнений алгоритм автоматизованого керування зварювальним апаратом [47, 82]. Наведена схема не відображає усі існуючі алгоритми роботи зварювальних пристроїв, таких як, створення мікролінз (витягування й обробка на конус), з'єднання волокон з різними діаметрами модових полів, створення послаблюючих стиків, що реалізують функцію внесення втрат. Як правило, ці алгоритми реалізуються в програмному забезпеченні автоматизованих зварювальних апаратів, які розраховані на з'єднання широкого спектру волокон.

У загальному випадку автоматизована система керування (АСК) – це сукупність підсистем, які виділено за певною функціональною ознакою, які відповідають конкретним цілям і завданням керування [83, 96].

Однією з підсистем АСК є автоматизована система керування технологічним процесом (АСК ТП). Технологічний процес повинен бути розроблений таким чином, щоб обладнання, інструменти, оснащення, сировина та інше використовувалися найбільш повно, правильно і раціонально, що відповідно дозволить виконати завдання з найменшими витратами [44, 46].

Загальна схема автоматизованого керування процесом з'єднання ФКВ передбачає послідовну реалізацію двох етапів: ідентифікацію параметрів розташування керованих об'єктів, а саме двох ФКВ, та визначення поточних значень сигналів керування (рис.2.2).

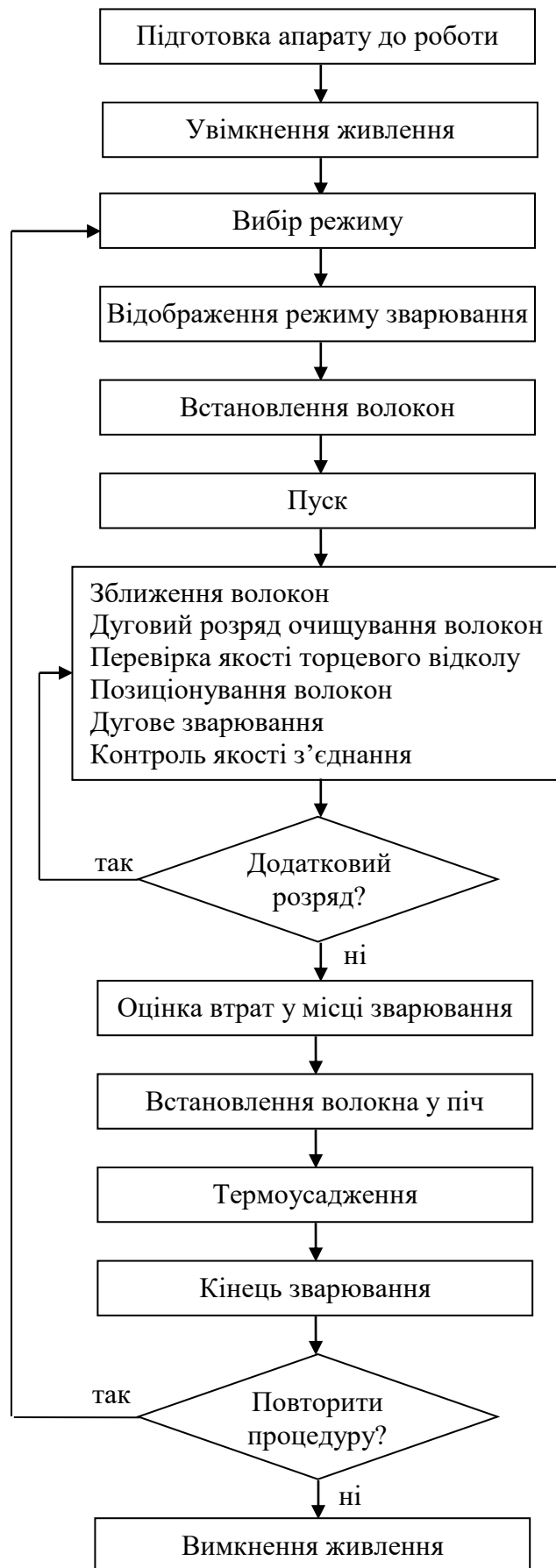


Рисунок 2.1 – Алгоритм автоматизованого керування зварювальним апаратом

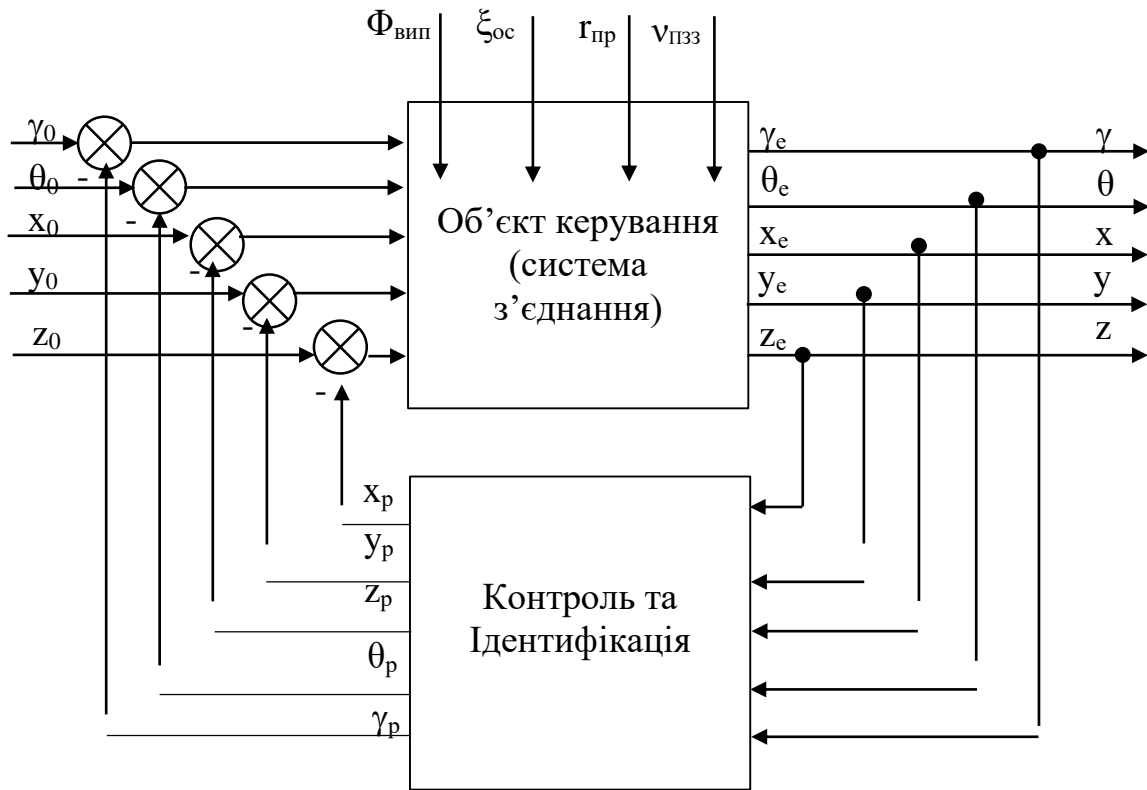


Рисунок 2.2 – Загальна схема керування процесом з'єднання ФКВ

Математично структуру моделі автоматизованого керування процесом з'єднання ФКВ можна записати у вигляді [94]:

$$(x, y, z, \theta, \gamma) = F(x_0, y_0, z_0, \theta_0, \gamma_0, P_{PCF}, \rho, \xi_{oc}, v_{ПЗЗ}, \Phi_{вин}, r_{пр}), \quad (2.1)$$

де x_0, y_0 – розраховані поперечні координати положення ФКВ;

z_0 – розраховані координати поздовжнього положення ФКВ;

θ_0 – розрахований кут нахилу ФКВ;

γ_0 – розраховані координати положення ФКВ за кутом повороту навколо поздовжньої осі;

P_{PCF} – параметри фотонно-кристалічного волокна;

ρ – зміщення ФКВ;

ξ_{oc} – похибки оптичної системи;

$v_{ПЗЗ}$ – похибки матриці ПЗЗ;

$\Phi_{вин}$ – параметри світлового потоку випромінювання;

$r_{пр}$ – похибки приводів системи позиціонування за лінійними осями.

На виході даної моделі отримаємо просторові координати розташування осі ФКВ, які забезпечать мінімальні розузгодження в процесі позиціонування і з'єднання. Задані результативні характеристики процесів з'єднання ФКВ переважно забезпечуються саме операціями автоматизованого контролю розташування (позиціонування) об'єктів керування.

До складу АСК ТП входять такі види забезпечення:

- інформаційне забезпечення включає інформацію, що характеризує стан системи керування, класифікатори технологічної і техніко-економічної інформації, масиви даних та документів, необхідних для виконання функцій АСК ТП, зокрема нормативно-довідкову інформацію, схему інформаційних потоків;

- математичне забезпечення включає математичні методи, моделі та алгоритми для керування системою та вирішення завдань обробки інформації;

- програмне забезпечення, в яке входить сукупність програм та програмних засобів з документацією на них, необхідних щоб реалізувати функції АСК ТП;

- технічне забезпечення, яке включає обчислювальні пристрої, засоби отримання інформації, засоби перетворення, зберігання, відображення та реєстрації інформації, пристрої передачі сигналів та виконавчі пристрої, що керують процесом;

- організаційне забезпечення, до складу якого входять документи, які визначають функції підрозділів керування, дій та взаємодія персоналу АСК;

- метрологічне забезпечення це комплекс організаційно-технічних заходів, які забезпечують визначення з необхідною точністю характеристик виробів, параметрів ТП, обладнання.

Визначальними складовими системи керування з'єднанням ФКВ є ідентифікація та контроль об'єктів. В залежності від точності та ретельності проведення контролю на цьому етапі забезпечується отримання якісного, з малими втратами з'єднання. До початку процесу зварювання та по його завершенні перевіряється зміщення оптичних волокон, стан торцевих поверхонь, а також деформація. При здійсненні операційного контролю вирішуються завдання позиціонування волокон (досягнення мінімального кутового, поздовжнього, поперечного зміщень, суміщення модових полів ФКВ), а також отримання рівного відколу торців волокон, що з'єднуються.

За результатами аналізу технологічного процесу з'єднання ФКВ запропоновано загальну структуру автоматизованої системи керування ТП та її зв'язок із етапами технологічного процесу (рис. 2.3).

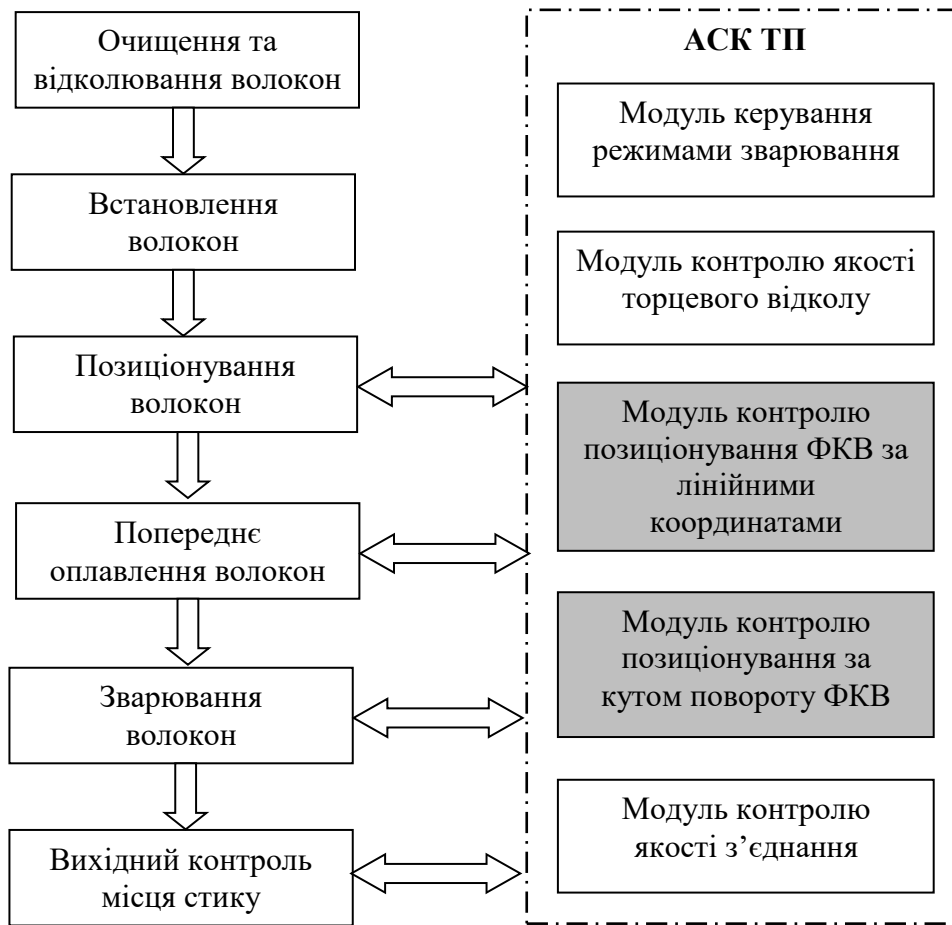


Рисунок 2.3 – Структурна схема взаємодії АСК ТП з етапами ТП зварного з'єднання ФКВ

Основними етапами технологічного процесу виконання зварного з'єднання є [47]:

- підготовка торцевих поверхонь оптичних волокон;
- встановлення підготовлених кінців оптичних волокон у направляючі системи зварювального апарата;
- позиціонування оптичних волокон;
- попереднє оплавлення торців оптичних волокон з метою видалення мікронерівностей, які виникають у процесі відколювання;
- безпосереднє зварювання оптичних волокон;
- оцінка якості зварювання.

2.2 Структурні схеми автоматизованих модулів контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон

Для здійснення процедур ідентифікації в роботі розроблено типові структури автоматизованих модулів контролю позиціонування ФКВ. Причому потрібні результативні характеристики процесів з'єднання ФКВ переважно забезпечуються саме операціями автоматизованого контролю розташування об'єктів керування. При розробці типових структур автоматизованих модулів контролю позиціонування ФКВ визначені функції системи (ФЗ), інформаційне (ІЗ), математичне (МЗ), алгоритмічне (АЗ), програмне (ПЗ) та технічне (ТЗ) забезпечення.

Реалізація мети передбачає визначення безлічі функцій і функціональних завдань, що обумовлюють функціональну частину системи по відношенню до її забезпечуваної частини (інформаційне, математичне, алгоритмічне тощо).

Функціональні завдання дозволяють визначити вимоги до вмісту елементів кожного із забезпечень. У свою чергу, ФЗ, МЗ, АЗ, а також ІЗ визначаються складом і функціями технологічного об'єкту керування [98]. Тому формування типової автоматизованої системи контролю, виявлення її компонентів і їх взаємозв'язку повинні спиратися на результати дослідження класів об'єкту керування. Розроблення загальної структури технологічного модуля автоматизованого контролю позиціонування і якості з'єднання виконувалося з урахуванням усіх зазначених компонентів (рис. 2.4).

Загальна структурна схема дозволяє сформулювати напрямок подальших досліджень для вирішення проблем контролю позиціонування і якості з'єднання ФКВ у процесі зварювання, визначити склад кожного з елементів та розробити модулі автоматизованого контролю позиціонування ФКВ за лінійними координатами та за кутом повороту навколо поздовжньої осі, тобто за формою і розміром модового поля.

Враховуючи вище сказане, на базі узагальненої схеми (рис. 2.4) спроектовано два модулі автоматизованого контролю позиціонування ФКВ за лінійними координатами та за кутом повороту ФКВ навколо поздовжньої осі. На рис. 2.5 і рис. 2.6 подано структурні схеми модулів автоматизованого контролю позиціонування ФКВ.

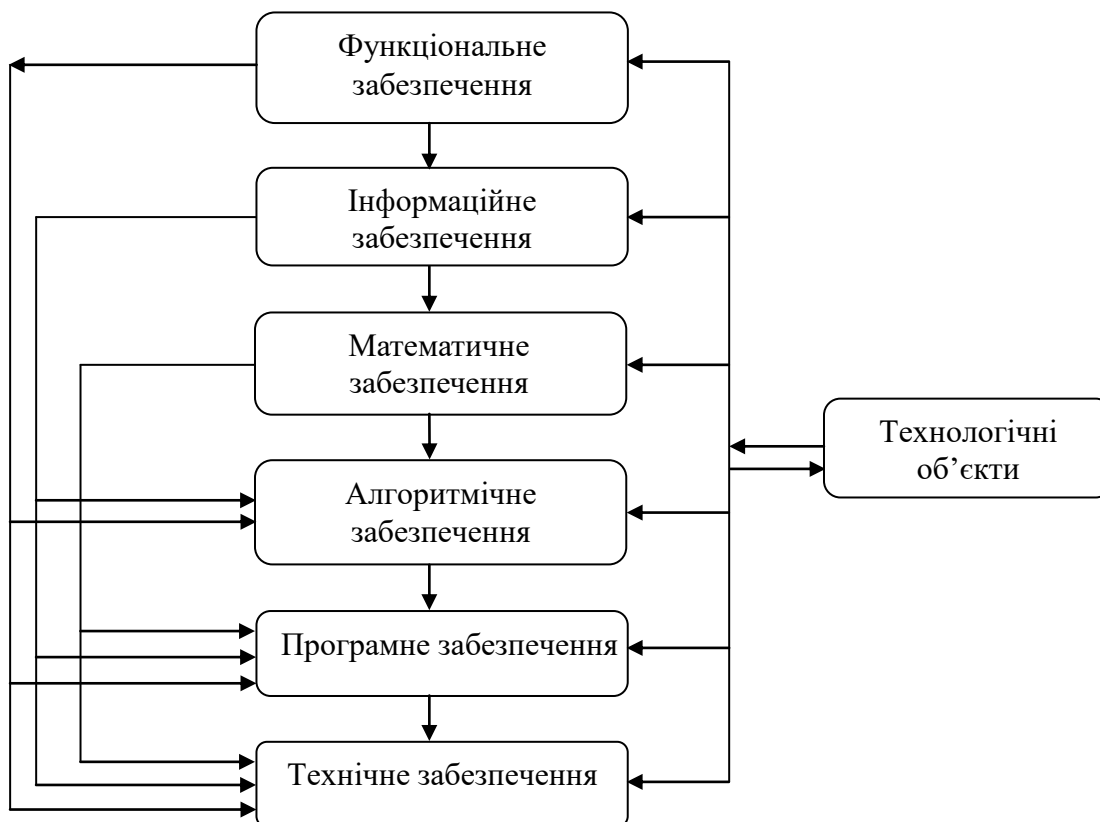


Рисунок 2.4 – Загальна структурна схема автоматизованого модуля контролю

Автоматизований модуль контролю розглядається як сукупність функціонального, інформаційного, математичного, алгоритмічного, програмного та технічного забезпечень.

У рамках кожного із забезпечень на рис. 2.5 і рис 2.6 позначено складові, які забезпечують вирішення конкретної задачі – автоматизованого контролю процесу позиціонування за поперечними та поздовжніми зсувами між ФКВ, що з'єднуються та за взаємним кутом повороту.

З проведеного аналізу технологічного процесу з'єднання фотонно-кристалічних волокон, оптичних методів контролю та розроблених структурних схем модулів автоматизованого контролю позиціонування за лінійними координатами та за кутом повороту ФКВ, можна виділити декілька груп структурних елементів.

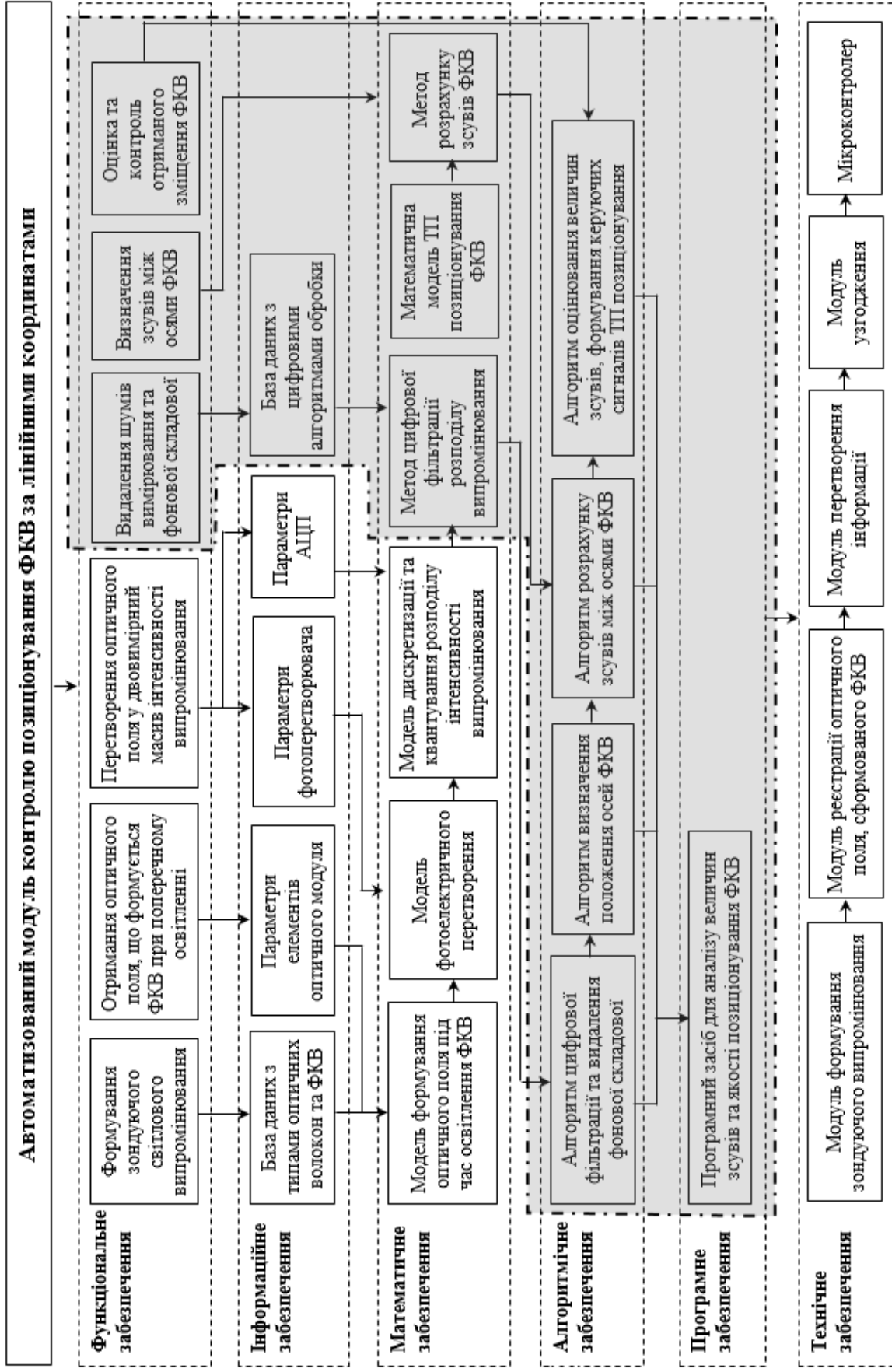


Рисунок 2.5 – Структурна схема автоматизованого модуля контролю позиціонування ФКВ за лінійними координатами

Автоматизований модуль контролю позиціонування за кутом повороту ФКВ

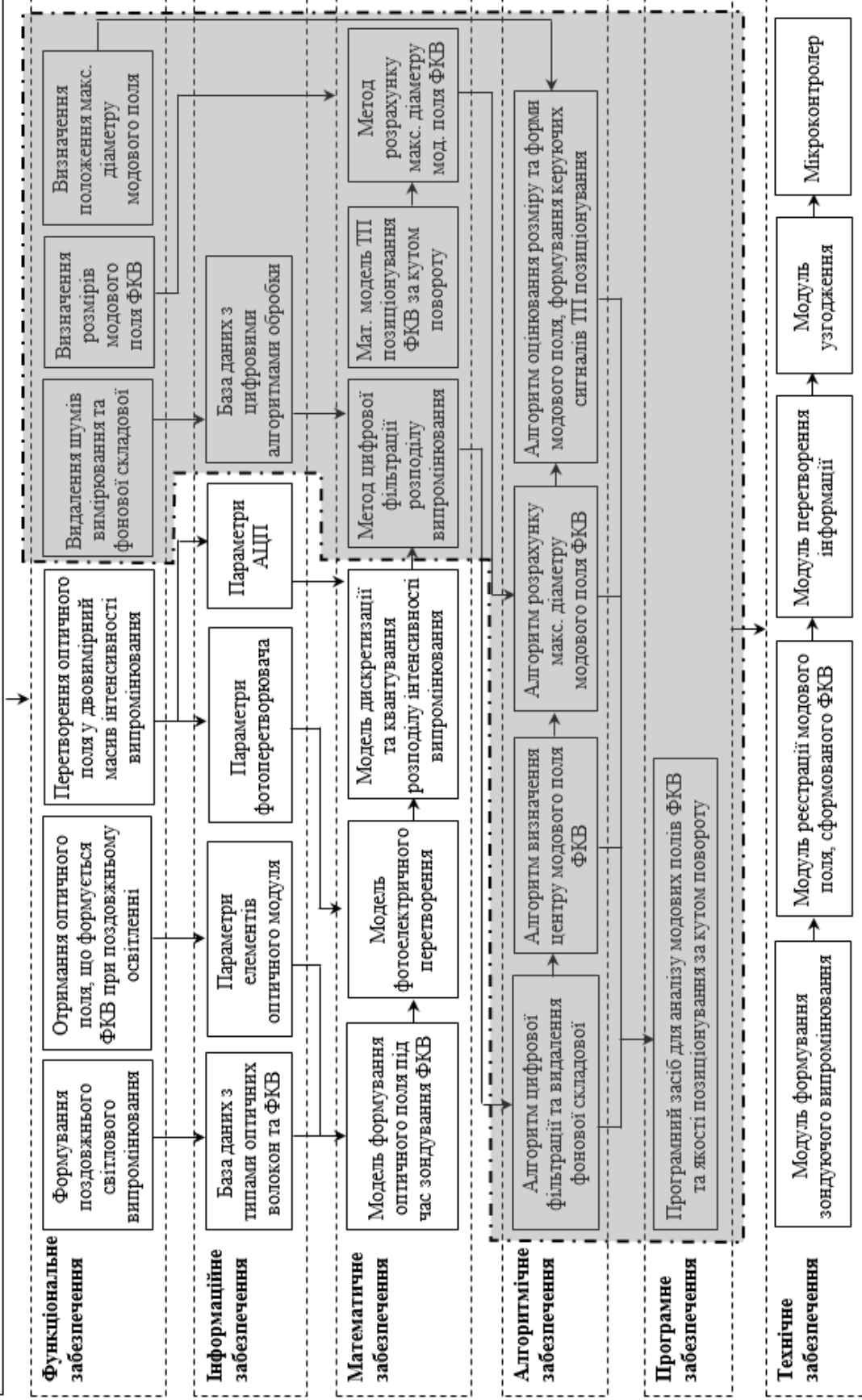


Рисунок 2.6 – Структурна схема автоматизованого модуля контролю позиціонування ФКВ за кутом повороту

Першу групу складають елементи, які пов'язані з формуванням результатів взаємодії зондуючого випромінювання з об'єктом контролю, їх перетворення з оптичного виду в електричний, а потім із аналогової форми в цифрову у вигляді двовимірної інформаційної масиви. Дана група містить типові моделі, що описують процес введення та розповсюдження випромінювання в оптичних волокнах, перетворення випромінювання оптичною системою, фотоелектричного перетворення багатоелементними приймачами зображення, дискретизації та квантування.

Описані функції і моделі цієї групи забезпечують наступні технічні засоби: пристрої формування та введення випромінювання через волокно, оптичні модулі, багатоелементні фотоприймачі, аналого-цифрові перетворювачі зі схемами узгодження.

Інша група містить методи розрахунку зсувів ФКВ в процесі з'єднання і визначення положення максимального діаметра модового поля ФКВ. Дані методи базуються на математичних моделях ТП позиціонування ФКВ за лінійними координатами і за кутом їх взаємного повороту. Ця група (на рис. 2.5 і рис. 2.6 виділено сірим кольором) вперше запропонована і потребує створення нових методів і моделей.

Забезпечення функцій і математичних методів і моделей даної групи вимагає розробки відповідних алгоритмічних і програмних комплексів.

Функціональне забезпечення автоматизованого модуля контролю позиціонування базується на оптичних методах, та містить наступні блоки:

- формування зондуючого світлового випромінювання;
- отримання оптичного поля, що формується ФКВ при поперечному та поздовжньому освітленні;
- перетворення оптичного поля у двовимірний масив інтенсивності випромінювання;
- видалення шумів вимірювання та фонові складові;
- визначення зсувів між осями ФКВ;
- визначення розмірів модового поля ФКВ;
- оцінка та контроль зміщення ФКВ;
- визначення положення максимального діаметру модового поля фотонно-кристалічних волокон.

В монографії розглядаються та розробляються наступні елементи представлених структурних схем автоматизованих модулів контролю позиціонування за лінійними координатами та за кутом повороту ФКВ поздовж осі:

- функціональне забезпечення, що містить функції обробки зображення оптичного поля ФКВ та визначення зсувів та кутової неузгодженості між отонно-кристалічними волокнами;

- математичне забезпечення у вигляді математичної моделі ТП позиціонування ФКВ та методів розрахунку зсувів ФКВ та положення максимального діаметру модового поля;

- алгоритмічного та програмного забезпечення, що дозволить автоматизувати процес контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон в процесі з'єднання.

3 МЕТОД КОНТРОЛЮ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН В ПРОЦЕСІ З'ЄДНАННЯ ЗА ЛІНІЙНИМИ КООРДИНАТАМИ

3.1 Метод контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон в процесі з'єднання

Як вже відзначалося, для надійної передачі оптичного сигналу з малими втратами визначальним є забезпечення прецизійного позиціонування ФКВ, які з'єднуються між собою або зі стандартним оптичним волокном. Як відомо, значні зміщення ФКВ призводять до збільшення затухання оптичного сигналу. Однією з основних для забезпечення низького рівня внесених втрат є задача визначення просторового розташування об'єктів позиціонування. Рішення даної задачі досягається розробкою спеціальних методів, що повинні забезпечити похибки позиціонування, які не перевищують одиниць відсотків контрольованих величин і складають десяті частки мікрометра.

Сучасні зварювальні апарати засновані на двох основних принципах вирівнювання оптичних волокон під час з'єднання: за оболонкою або за серцевиною ОВ. Вирівнювання за оболонкою – пасивний вид юстування, який здійснюється за допомогою V-образних напрямних, які фіксують кінці оптичних волокон, що з'єднуються. Як правило, такий вид юстування застосовується для зварювання оптичних волокон, коли не висуваються високі вимоги до внесених втрат.

Юстування за серцевиною ОВ виконується автоматично. Автоматизація процесу досягається шляхом введення у зварювальний апарат системи автоматичного керування, узагальнена функціональна схема якої представлена на рис. 3.1 [60, 82].

Керування системою юстування волокон, струмом зварювання (дуги) й джерелами випромінювання здійснюється мікроконтролером, який обробляє сигнали фотоприймачів у відповідності з алгоритмом, що використовується. Введення необхідних вихідних даних і програми математичної обробки зазначених сигналів здійснюється з терміналу зварювального апарату під час

контролю цифрової і графічної інформації про введені данні, процеси та результати зварки за допомогою дисплею.

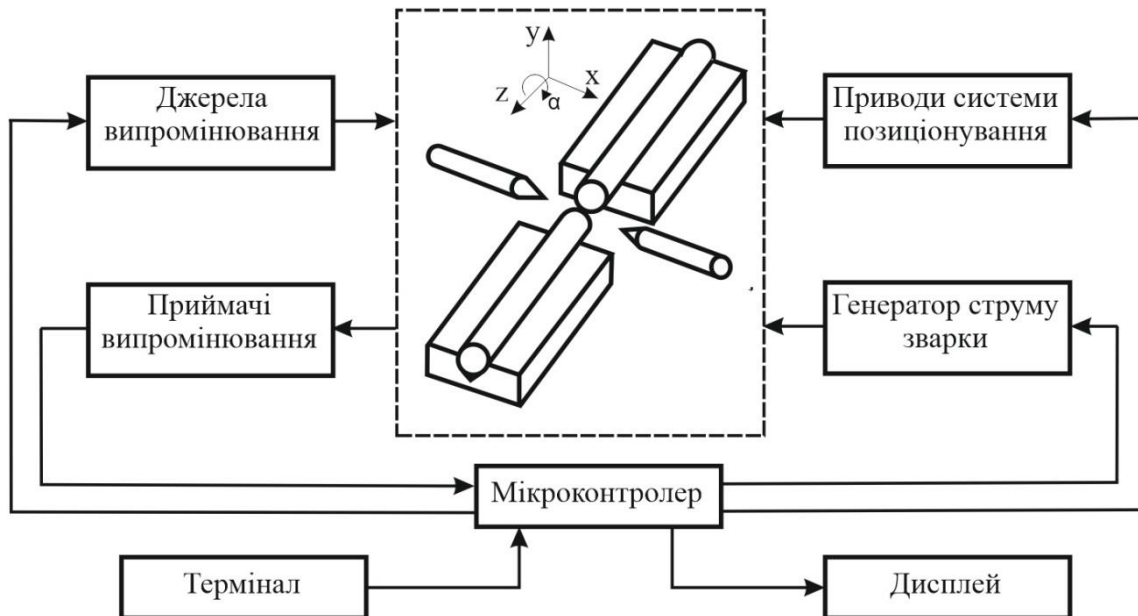


Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи керування зварювальним апаратом

Застосування у зварювальних апаратах ПЗЗ фотоприймачів дозволяє перед початком зварювання візуально контролювати результат позиціонування, тип волокна, якість торців та мікрозабруднення оптичних волокон, що з'єднуються, а по закінченню зварювання – оцінити якість зварного з'єднання. Крім того, низка зварювальних апаратів представляє в цифровому вигляді інформацію про значення кута відколу та зсуву осей оболонок (серцевин) волокон до та після зварювання, а також розрахункове значення втрат у місці зварки.

Юстування волокон виконується за допомогою крокових двигунів і прецизійних елементів приводу (як правило, на основі п'єзоефекту), забезпечуючи позиціонування у чотирьох напрямках: у горизонтальному, вертикальному, поздовжньому та навколо осі серцевини ФКВ. При цьому використовується одна з систем контролю: система LID (Local light Injection and Detection) – позиціонування за максимальною потужністю випромінювання, базується на методі поздовжнього зондування та реєстрації сигналу у ближній зоні або система PAS (Profile Alignment System) – позиціонування за

геометричними параметрами або вирівнювання волокон за допомогою аналізу теплових зображень, базується на методі фокусування.

LID-метод позиціонування оптичних волокон полягає в введенні контрольного оптичного сигналу в серцевину першого волокна та зняття його з серцевини іншого та максимізацією вихідного сигналу за рахунок переміщення волокон мікропереміщувачами [36, 37]. При цьому введення та виведення оптичного випромінювання виконується в місцях вигину оптичних волокон. Необхідна форма вигину волокон забезпечується спеціальними оправками, які крім цього притискають волокна в місцях вигину к оптичному випромінювачу та приймачу. Юстування закінчується, коли на виході реєструється максимальний сигнал. Але під час з'єднання волокон з різними діаметрами модових полів може бути так, що діаметр серцевини приймаючого волокна буде більше діаметра передаючого. При цьому показання вимірювача потужності будуть припустимими, однак можливе зміщення осей волокон негативно відобразиться на якості з'єднання. Крім того, фотонно-кристалічні волокна порівняно зі стандартними більш чутливі до механічних ушкоджень, які можуть бути викликані вигином, внаслідок чого структура повітряних отворів в оболонці руйнується. А це також негативно впливатиме на якість передачі сигналу.

Принцип PAS-методу полягає в наступному. Оптичне волокно освітлюється пучком колімованого некогерентного світла перпендикулярно осі волокна. Волокно фокусує світло, діючи, як циліндрична лінза. Частина промінів, які проходять на відстані від центру серцевини близько до радіусу серцевини, перетерплюють заломлення на границі серцевина – оболонка, внаслідок чого в невеликій області за серцевиною виникає провали у розподілі щільності світлової енергії, які в площині зображення спостерігаються у вигляді темних ліній на світлому фоні. Юстування ОВ полягає у суміщенні темних ліній, відповідних границям серцевин першого та другого волокна. Розподіл потоку випромінювання на виході ОВ вимірюється відеокамерою, та отримані данні оброблюються на комп'ютері. При цьому формується зображення, на якому видно границі оболонки та серцевини волокон, що дозволяє визначити ексцентриситет в кожному з волокон, які з'єднуються. Похибка суміщення темних ліній порівняна з величиною роздільної здатності об'єктиву [68, 72].

Метод PAS дозволяє легко визначити границі серцевини й оболонки стандартного волокна. Отримуючи зображення за двома перпендикулярними осями можна досягти достатню якість позиціонування. Але у фотонно-кристалічних волокнах зображення повітряних отворів оболонки накладається на зображення серцевини, що заважає ідентифікувати серцевину візуально тільки за отриманим зображенням. Позиціонування ФКВ та стандартного оптичного волокна тільки за зовнішніми діаметрами оболонок також ускладнено, внаслідок того, що стандартне одномодове волокно та ФКВ не обов'язково мають однакові діаметри.

На рис. 3.2, а представлений зварювальний пристрій Coringer AFS-48, за допомогою якого проводилася експериментальна частина даної роботи. На збільшеному фото екрану пристрою (рис. 3.2, б) зображено місце стику ФКВ та стандартного одномодового волокна. У верхній частині екрану розташовано зображення, яке сформовано відеокамерою по горизонтальній осі, а в нижній – зображення, сформоване відеокамерою по вертикальній осі. Внаслідок великого діаметру ФКВ (172 мкм) частина зображення не вміщується на екрані апарату, який розрахований на роботу зі стандартними оптичними волокнами: одномодовими (ITU-TG.652) та багатомодовими (ITU-TG.651) діаметром 80...150 мкм [47].

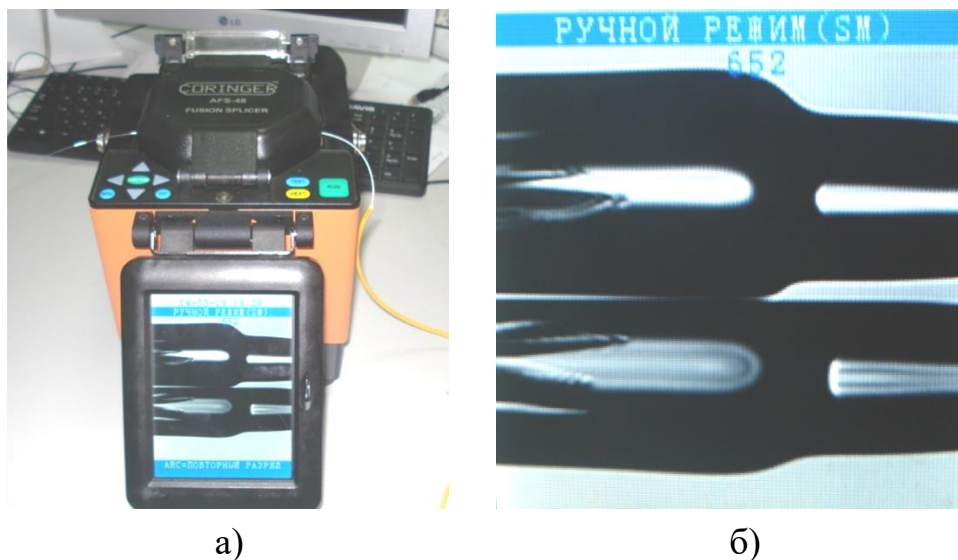


Рисунок 3.2 – Зварювальний пристрій Coringer AFS-48 (а) та отримане ним зображення дефектного зварного з'єднання ФКВ зі стандартним ОВ (б)

Крім зазначених проблем виконання прецизійного позиціонування фотонно-кристалічних волокон за допомогою сучасних методів та обладнання, треба враховувати ще й вплив оптичної системи на отримане зображення. Так, метод оцінки втрат за осьовими зміщеннями, який використовується в PAS системах, дає непрямую оцінку згасання з деякою невизначеністю пов'язаною з узгодженням геометричних параметрів системи спостереження й оптичного волокна. Тому даний метод гарантує лише граничну точність вимірювань.

Таким чином, необхідно розробити метод позиціонування, який би забезпечував високу точність та надійність під час виконання з'єднання фотонно-кристалічних волокон з урахуванням їх складної структури та особливостями виникнення втрат оптичного сигналу при розповсюдженні.

Запропонований метод контролю позиціонування ФКВ в процесі зварювання заснований на отриманні зображення системою PAS, тобто базується на методі фокусування. При цьому оптичне волокно освітлюється під прямим кутом щодо осі паралельним некогерентним світловим променем постійної інтенсивності. Промінь, що проходить крізь волокно, заломлюється та виходить з нього вже під іншим кутом. Розподіл потоку випромінювання на виході ОВ фіксується відеокамерою, а отримані дані обробляються на автоматизованій установці.

З огляду на особливості ФКВ і компонентів на їх основі, основними з яких є малі геометричні розміри, складний характер зміни профілю показника заломлення, трансформація модового складу оптичних полів, що розповсюджуються, наявність джерел шуму, виникають проблеми в розпізнаванні зображень і визначенні просторового розташування волокон.

Традиційні методи обробки, що включають послідовні операції фільтрації зображень, рішення зворотних задач і визначення центрів картин розподілу оптичних полів, не завжди задовольняють суперечливим вимогам продуктивності і точності. Більшість методів рішення даної задачі засновані на стандартних методиках швидкого перетворення Фур'є або апроксимації амплітуди поля за методом найменших квадратів будь-яким багаточленом або сплайн-функціями [78].

При цьому такі підходи дозволяють лише відновити розподіл вихідного оптичного поля, усуваючи вплив особливостей лінійного перетворення вимірювальної системи (неоднозначність відповідності між входом і виходом

через обмежену смугу амплітудно-частотної характеристики системи і наявності похибок (шуму) вимірювання).

Технологія використання даних підходів припускає необхідність визначення за відновленими розподілами координат серцевин ФКВ. З огляду на складність оптичного розподілу (в якому цілком неможливо усунути зазначений вище вплив), не вдається сформулювати універсальну методику рішення даної задачі для ФКВ.

Найбільш розповсюдженими є два підходи: граничний – коли границі оптичного волокна визначаються за геометричними координатами точок функції розподілу оптичної інтенсивності, що відповідає перевищенню емпірично встановленого для фотонно-кристалічного волокна граничного рівня, та інтегральний – коли розраховують геометричні координати положення серцевини через центр мас функції розподілу інтенсивності поля у вигляді:

$$X_c = \frac{\int_{x_1}^{x_2} xI(x)dx}{\int_{x_1}^{x_2} I(x)dx}, \quad (3.1)$$

де $I(x)$ – функція розподілу інтенсивності.

Основним недоліком першого методу є те, що не враховується реальний розподіл оптичного сигналу, а також певні труднощі становить вибір граничних рівнів.

Недоліком використання другого способу є вплив форми розподілу оптичної інтенсивності і значний обсяг математичних обчислень. Подолання зазначених проблем вимагає пошуку і створення нових підходів у відпрацюванні методів і моделюванні алгоритмів обробки експериментальних даних [51].

Особливість будови оптичних волокон, в тому числі ФКВ, полягає в тому, що за відсутності неприйнятних дефектів створюваний ними розподіл інтенсивності поля має симетричний характер щодо осі серцевини (хоча і має незначні спотворення, викликані наявністю дефектів і забруднень поверхонь волокон або оптичних елементів) і являє собою парну функцію щодо осі, яка проходить через центр симетрії і співпадає з шуканою оптичною віссю

серцевини при відсутності зсуву. Тому задача контролю позиціонування полягає у визначенні поперечного зсуву центру симетрії сигналу. Рішення цієї задачі пропонується здійснювати з використанням принципу погодженої фільтрації у формі автозгортки.

Процес погіршення зображення під час вимірювання можна змодельовати у вигляді функції спотворення (рис. 3.3), яка разом з адитивним шумом $n(x)$ впливає на вихідне зображення $I(x, \rho)$ та призводить до спотворення сигналу:

$$\xi(x, \rho) = H[I(x, \rho)] + n(x), \quad (3.2)$$

де $I(x, \rho)$ – функція розподілу інтенсивності;

H – спотворюючий оператор;

$n(x)$ – адитивний шум з нульовим середнім значенням;

ρ – величина поперечного зсуву.

Маючи функцію $\xi(x, \rho)$, володіючи деякою інформацією про спотворюючий оператор H та знаючи основні характеристики адитивного шуму $n(x)$, можна побудувати деяке наближення $I(x, \rho)$ вихідного зображення. Метою відновлення зображення є побудова наближення, яке було б максимально близьким до вихідного зображення [84].

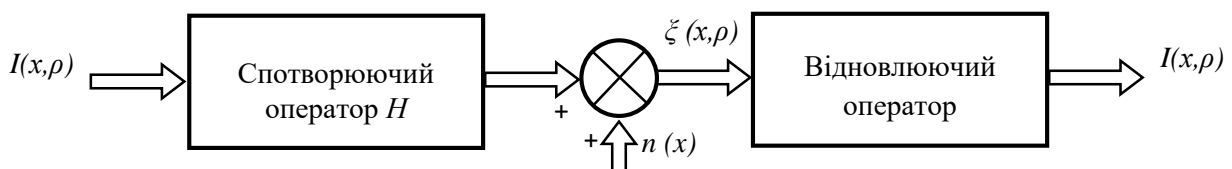


Рисунок 3.3 – Модель процесу спотворення/відновлення зображення

У випадку, коли спотворення зображення викликані виключно шумом, модель сигналу в перетині розподілу інтенсивності оптичного поля можна представити у вигляді [85]

$$\xi(x, \rho) = I(x, \rho) + n(x). \quad (3.3)$$

Погоджений фільтр є оптимальним фільтром, який мінімізує середньоквадратичну похибку у виділенні корисної складової $I(x, \rho)$ із суміші із

шумом $\xi(x, \rho)$. При цьому імпульсний відгук погодженого фільтра з точністю до постійного множника повинен становити звернену копію корисної складової, а саме

$$h(x, \rho) = \alpha I(-x, \rho), \quad (3.4)$$

де α – константа.

Вихідний сигнал погодженого фільтра визначається інтегралом згортки

$$s(z) = \xi(x, \rho) * h(x, \rho) = \int_{x_1}^{x_2} \xi(x, \rho) h(z - x) dx, \quad (3.5)$$

де x_1, x_2 – початкова та кінцева координата ділянки реєстрації.

З підстановкою (3.4) у (3.5) та якщо $\alpha = 1$ в точці $z = 0$ отримаємо

$$s(0) = \int_{x_1}^{x_2} I^2(x, \rho) dx + R_{ni}(0) \approx R_{ii}(0), \quad (3.6)$$

де оцінка взаємної коваріаційної функції шуму і сигналу R_{ni} близька до нуля внаслідок їхньої статистичної незалежності. Таким чином, вихідний сигнал погодженого фільтра відповідає автоковаріаційній функції корисної складової $I(x, \rho)$ і досягає максимуму в момент точної ідентифікації цієї складової.

Використання погодженого фільтра в загальному випадку припускає знання моделі сигналу. Покажемо, що рішення задачі визначення зсуву центру симетрії сигналу ρ можливо без апіорного знання значень параметрів сигналу.

З огляду на те, що корисний сигнал є парною функцією, зміщеної відносно початку координат в області незалежної змінної на величину ρ , можемо записати

$$I(x, \rho) = f(x - \rho), \quad (3.7)$$

де $f(x) = f(-x)$.

Ця властивість дозволяє використовувати в (3.4) копію вихідного розподілу сигналу, переверненого щодо вертикальної осі координат, а саме

$$h(x, \rho) = \xi(-x - \rho, \rho). \quad (3.8)$$

Підстановка (3.8) в (3.5) дає:

$$s(z) = \int_{x_1}^{x_2} \xi(x - \rho, \rho) \xi(x + \rho - z, \rho) dx \approx \int_{x_1}^{x_2} I(x, \rho) I(x + 2\rho - z, \rho) dx + \sigma_n^2, \quad (3.9)$$

що визначає операцію автозгортки. Властивістю автозгортки функції, що задовольняє умові (3.7), є залежність від параметра зсуву ρ . Якщо $\rho = 0$ у (3.9) довільному сигналу $I(x, \rho)$ відповідає інтеграл автозгортки

$$s(z) \approx \int_{x_1}^{x_2} I(x, \rho) I(z - x, \rho) dx. \quad (3.10)$$

У випадку якщо дотримується умова (3.7) та в (3.10) $z = 2\rho$, тоді досягається максимальне значення автозгортки

$$s(2\rho) = \int_{x_1}^{x_2} I^2(x, \rho) dx \Rightarrow \max\{s(z)\}, \quad (3.11)$$

яке збігається зі значенням відгуку (3.6) погодженого фільтра. Отже, ідентифікація положення центра симетрії розподілу інтенсивності оптичного поля зводиться до виконання автозгортки цього сигналу і визначенню положення максимуму результуючої функції.

Таким чином, можна запропонувати послідовність дій для комп'ютерної обробки виміряного розподілу інтенсивності оптичного поля методом автозгортки. Насамперед це реєстрація послідовності дискретних значень сигналу, формування другої послідовності зі зворотною перенумерацією елементів, попарне перемножування значень елементів цих послідовностей і знаходження суми отриманих добутків. Необхідно відмітити, що максимальному результуючому значенню отриманої суми відповідає такий зсув

другої послідовності відносно першої, за яким спостерігається їхній збіг за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки.

У результаті, запропонований метод дозволяє визначити координати центру одновимірного розподілу оптичного поля, сформованого фотонно-кристалічним волокном при поперечному зондуванні світловим променем. Таким чином, отримуємо одновимірний масив з випадковими значеннями розрахованих методом автозгортки центрів перетинів [53, 55, 68]. Щоб отримати інформацію про просторове розташування осей фотонно-кристалічних волокон, необхідно побудувати лінії регресії, за якими далі розраховуються поперечний та поздовжній зсув осей ФКВ, а також кут їх нахилу (рис. 3.4). Рівняння регресії для осей першого і другого ФКВ відповідно мають вигляд:

$$Y_1(x) = a_1x + b_1; y_2(x) = a_2x + b_2. \quad (3.12)$$

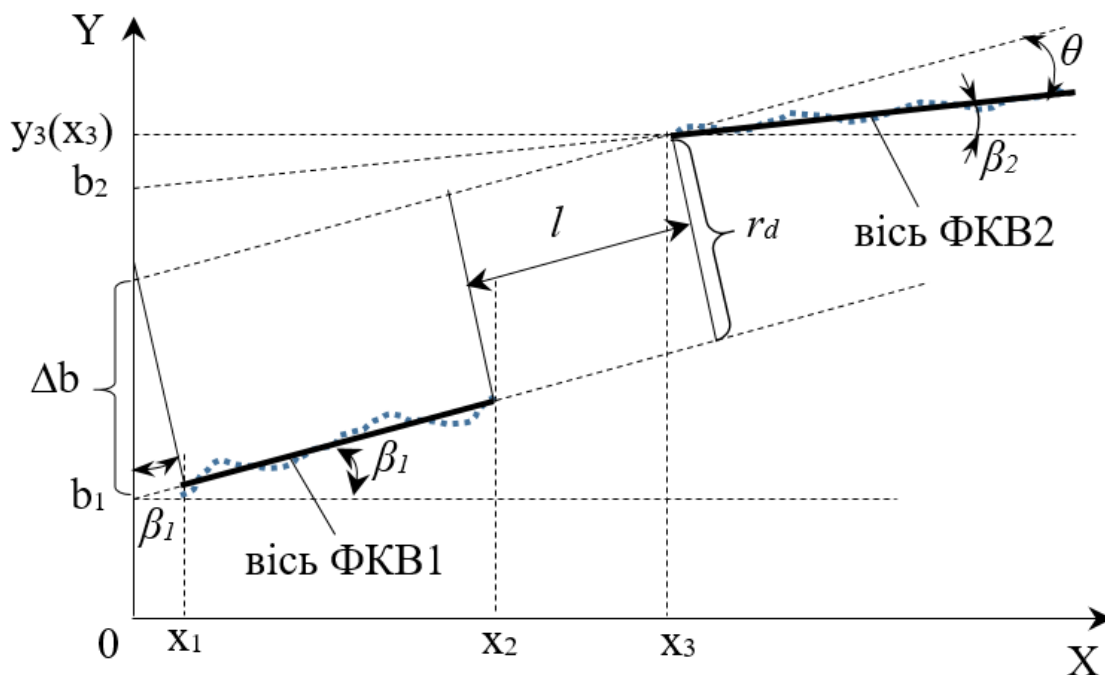


Рисунок 3.4 – Геометрична модель для визначення кутового нахилу ФКВ, поперечного та поздовжнього зміщення

Кути нахилу осей ФКВ розраховуються як

$$\beta_1 = \arctg(a_1), \quad \beta_2 = \arctg(a_2). \quad (3.13)$$

Кут взаємного нахилу осей фотонно-кристалічних волокон розраховується за формулою:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{a_1 + a_2}{1 - a_1 a_2}. \quad (3.14)$$

Поперечний зсув осей ФКВ визначається наступним чином:

Поздовжнє зміщення осей ФКВ визначається співвідношенням:

3.2 Моделювання та дослідження точності процесу позиціонування ФКВ при поперечному освітленні за допомогою метода автозгортки

Ефективність та точність пропонованого методу контролю позиціонування ФКВ перевірялися методами комп'ютерного моделювання [65, 89-91]. У ході дослідження задавався нормований до одиниці вихідний розподіл інтенсивності оптичного поля $I(x)$ ($0 \leq x \leq 2000$) у вигляді масиву даних (рис. 3.5). Вісь симетрії даного розподілу проходить паралельно осі ординат через точку, яка визначає положення центру серцевини фотонно-кристалічного волокна $x_{cp} = 1000$.

Вплив випадкової похибки вимірювання імітувався у вигляді 10% гаусівського шуму з нульовим середнім значенням. На рис. 3.6 приведені зміщений на 150 елементів відносно середнього ($x_{cp} = 1000$) вихідний сигнал (суцільна лінія) та цей же сигнал з додаванням помилок вимірювання (пунктирна лінія).

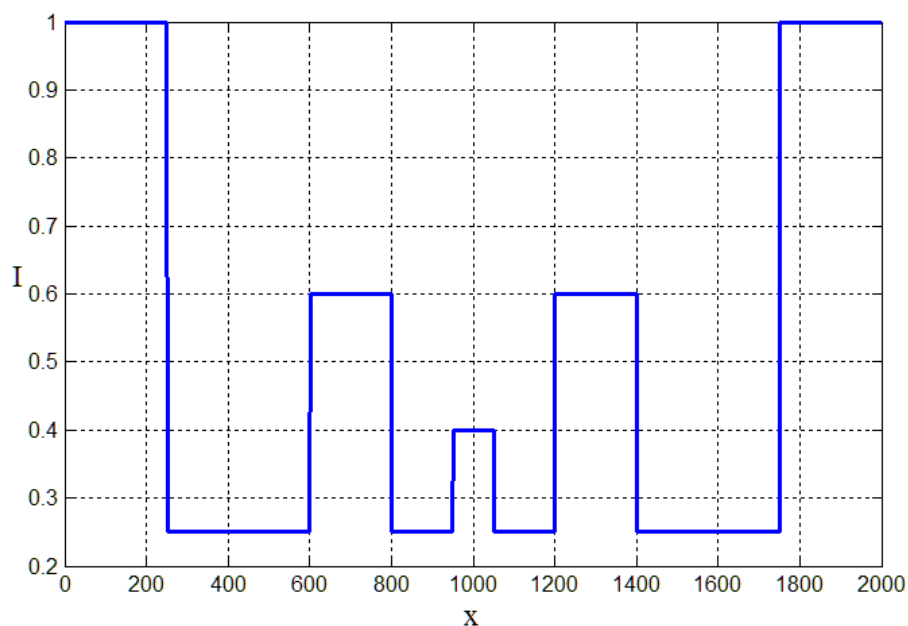


Рисунок 3.5 – Вихідний розподіл інтенсивності оптичного поля

Під час експериментів спостерігався значний вплив фонові складові оптичного поля (ділянок, які розташовані з боків волокна) на точність розрахунків. Причиною цьому є висока інтенсивність вказаних ділянок, що призводить до грубих помилок у визначенні центру волокна.

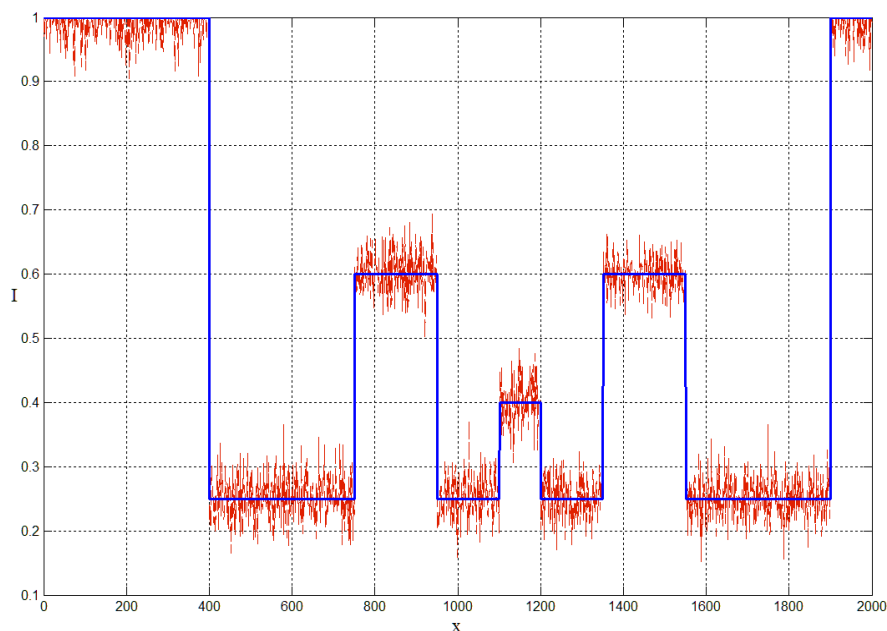


Рисунок 3.6 – Тестовий сигнал (суцільна лінія) та сигнал з 10% похибкою вимірювання (пунктирна лінія) зсунені на $\rho = 150$ елементів вправо відносно середнього $x_{cp} = 1000$

Рішенням даної проблеми є видалення фонові складові. Для цього запропоновано обчислити диференціал оптичного сигналу (рис. 3.7), що дозволить виділити точки, в яких відбувається різка зміна інтенсивності випромінювання. Найперші мінімальне значення інтенсивності з лівої сторони та максимальне з правої сторони і визначатимуть границі оболонки волокна.

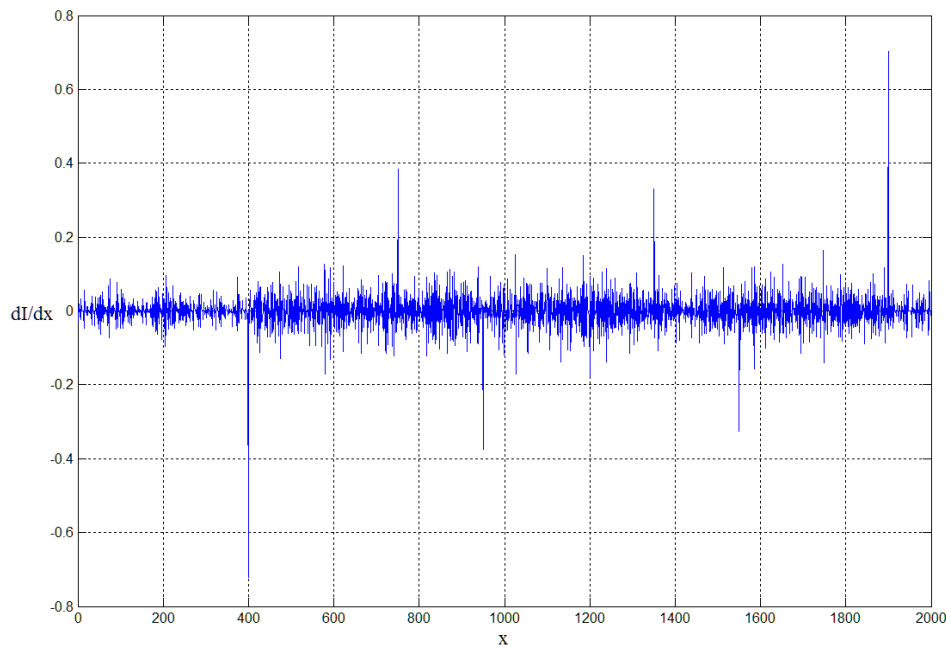


Рисунок 3.7 – Диференціал тестового сигналу

Змінюючи значення інтенсивності оптичного поля в точках менших мінімального значення і більших максимального на нулі (рис. 3.8), виключаємо вплив фонові складові на подальші розрахунки:

$$I(x) = 0, \text{ при } x \in [0, 400] \cup [1900, 2000].$$

Після формування сигналу з 10% помилкою та видалення фонові складові, виконувалася операція автозгортки (рис. 3.9). Після чого було визначено координату максимального елемента сформованого масиву $x_{max} = 2300$. Далі було знайдено координата центру розподілу інтенсивності фотонно-кристалічного волокна K , виходячи з того, що координата максимуму автозгортки у два рази більша, тобто:

$$K = \frac{x_{max}}{2} = 1150.$$

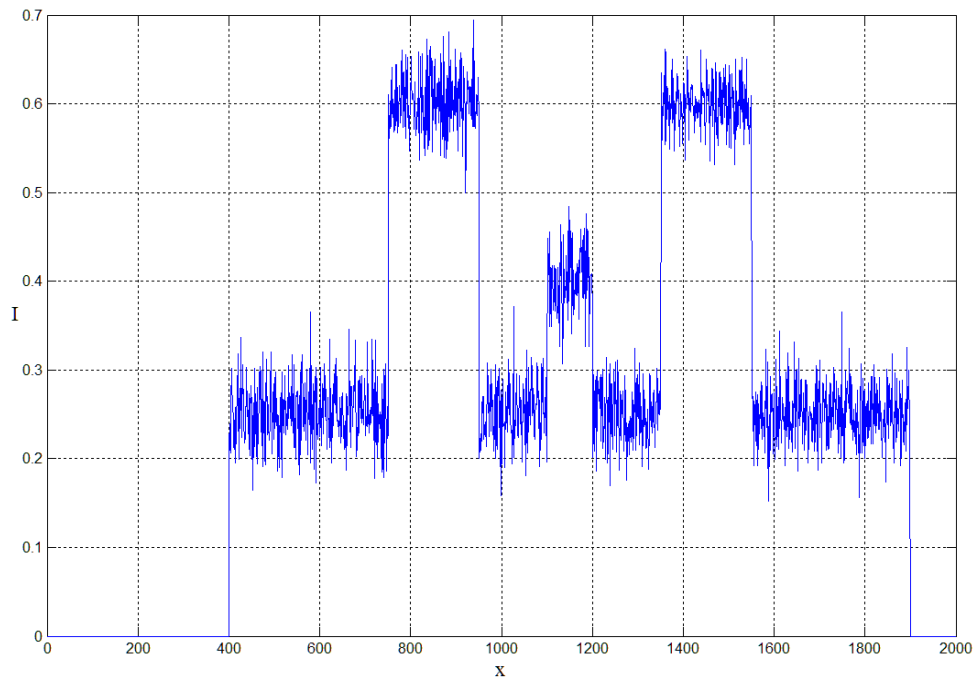


Рисунок 3.8 – Тестовий сигнал з виключеним фоном

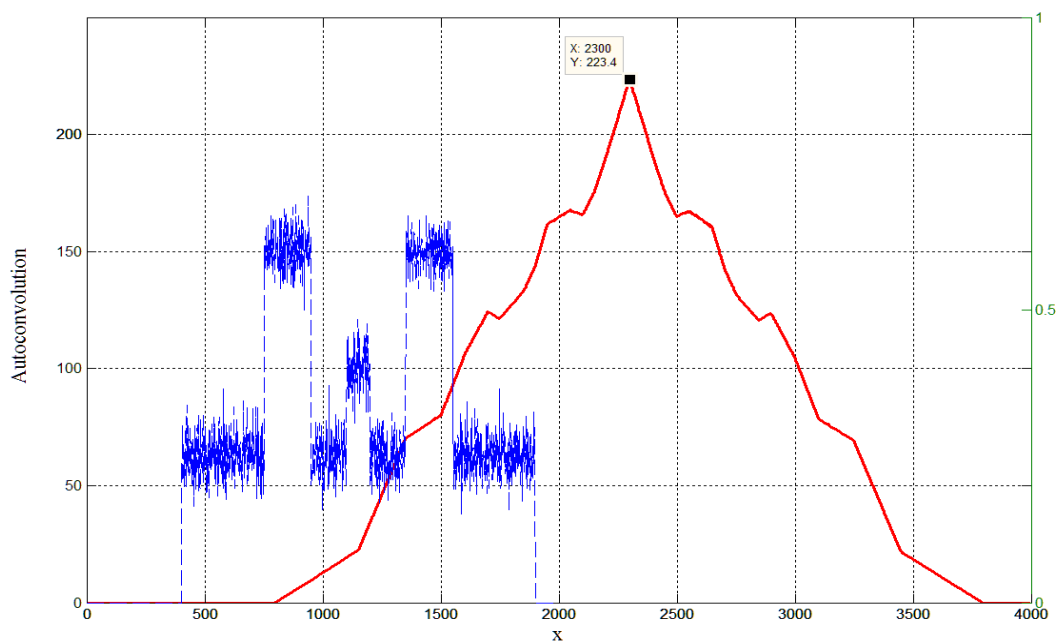


Рисунок 3.9 – Тестовий сигнал та його автозгортка

Таким чином, розраховане методом автозгортки значення координати центру розподілу ФКВ K співпадає зі значенням заданого середнього елемента з урахуванням зсуву $x_{cp} + \rho = 1000 + 150 = 1150$.

3.3 Структурна схема системи керування позиціонуванням фотонно-кристалічних волокон за лінійними координатами

За результатами теоретичного обґрунтування та дослідження характеристик точності запропонованого методу розроблено структурну схему системи керування позиціонуванням фотонно-кристалічних волокон за лінійними координатами (рис. 3.10).

Дана структурна схема містить два випромінювача, що освітлюють волокно за поперечними координатами x та y , з передатною функцією

$$W_{вип}(s) = W_{дж.л\delta}(s) \cdot W_{л\delta}(s) \cdot W_{фм}(s), \quad (3.17)$$

де $W_{дж.л\delta}(s)$ – передатна функція джерела живлення випромінювача;

$W_{л\delta}(s)$ – передатна функція лазерного діоду;

$W_{фм}(s)$ – передатна функція фільтра мод.

Фотоприймачі та перетворювачі сигналів реєструють оптичне поле, сформоване фотонно-кристалічним волокном з передатною функцією $W_{PCF}(s)$, та перетворюють його у цифровий вигляд. Передатну функцію блоку формування і обробки зображення можна записати у вигляді:

$$W_{зобр}(s) = W_{oc}(s) \cdot k_n \cdot W_{ПЗС}(s) \cdot W_{АЦП}(s), \quad (3.18)$$

де $W_{oc}(s)$ – передатна функція оптичної системи;

$W_{ПЗС}(s)$ – передатна функція матриці ПЗЗ;

k_n і $W_{АЦП}(s)$ – коефіцієнт підсилення і передатна функція аналогово-цифрового перетворювача.

Далі сформований сигнал у вигляді масиву інтенсивностей випромінювання, потрапляє до ідентифікатора, який реалізує математичну складову автоматизованої системи.

Ідентифікатор за зображенням оптичного поля визначає значення зміщень між ФКВ та регулює їх положення через приводи системи юстування.

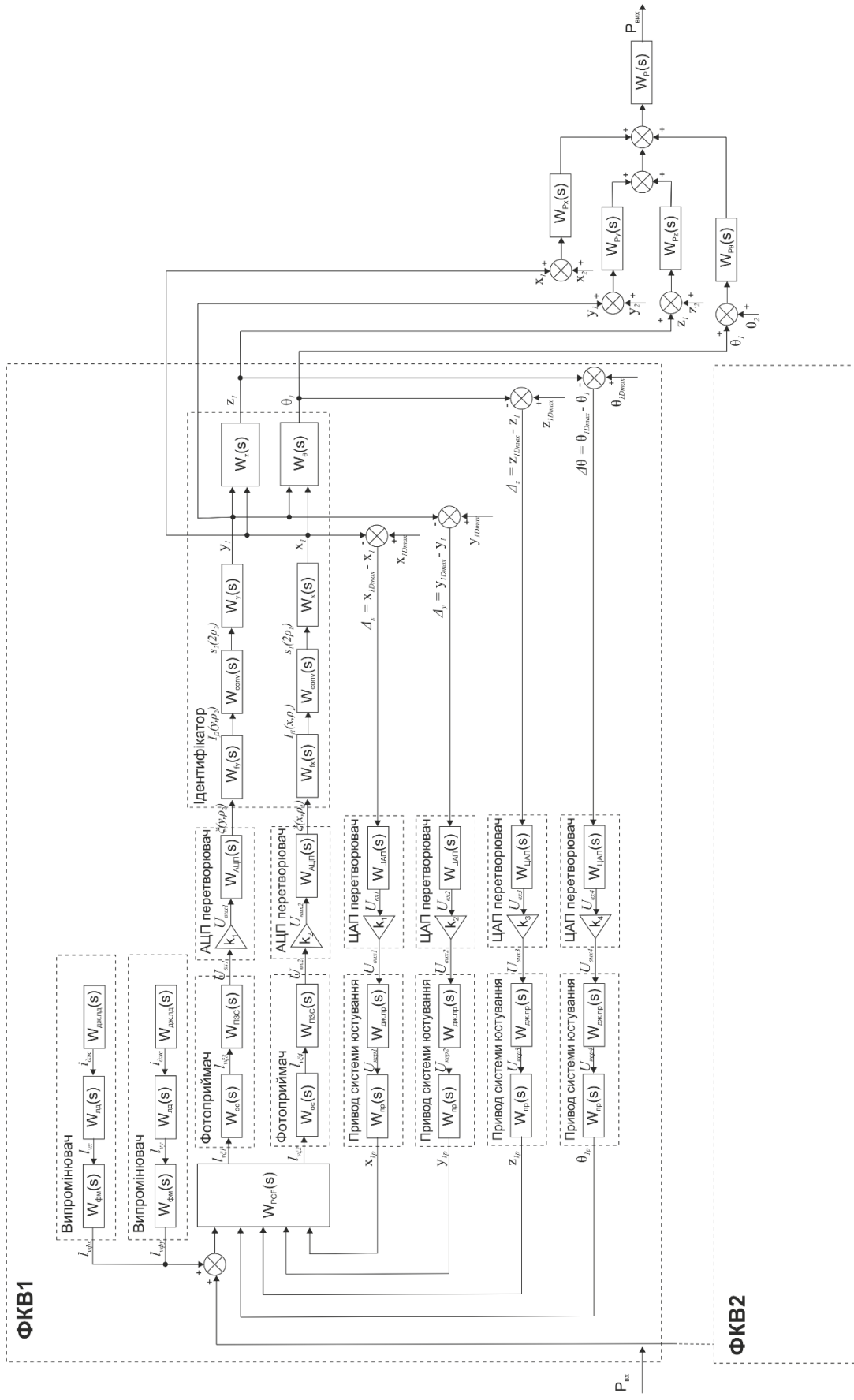


Рисунок 3.10 – Структурна схема системи керування позиціонуванням ФКВ за лінійними координатами

Приводи зміщують ФКВ за поперечними і поздовжніми координатами, змінюють кут нахилу волокон. Еквівалентна передатна функція цифроаналогового перетворювача та приводу системи юстування має вигляд:

$$W_{юстм}(s) = W_{ЦАП}(s) \cdot k_m \cdot W_{джер.пр}(s) \cdot W_{пр}(s), \quad (3.19)$$

де k_m і $W_{ЦАП}(s)$ – коефіцієнт підсилення і передатна функція цифроаналогового перетворювача;

$W_{джер.пр}(s)$ – передатна функція джерела живлення приводу системи юстування;

$W_{пр}(s)$ – передатна функція приводу системи юстування.

На виході системи керування відбувається розрахунок геометричних розузгоджень між ФКВ за лінійними координатами та визначаються очікувані втрати оптичної потужності.

В даній роботі розроблений метод позиціонування реалізований в ідентифікаторі системи позиціонування. На рис. 3.11 подано функціональну схему процесу позиціонування за однією координатою з використанням ідентифікатору [95, 97].

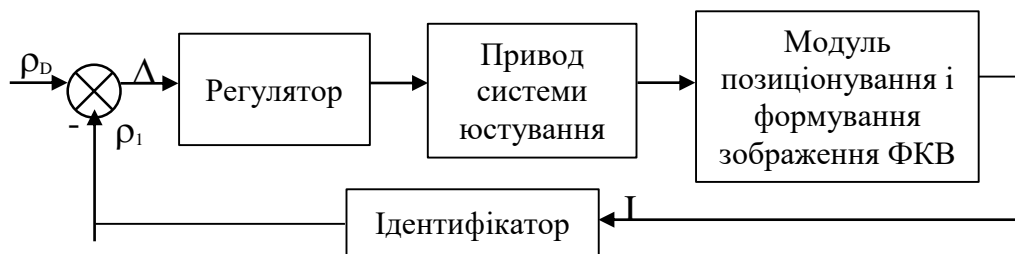


Рисунок 3.11 – Функціональна схема процесу позиціонування за однією координатою

На вхід подається задане зміщення ФКВ ρ_D . На ідентифікатор системи подається зображення оптичного поля, сформованого ФКВ, у вигляді масиву інтенсивності I , за яким робиться висновок про просторове розташування осі волокна. Далі визначається величина Δ , на яку потрібно перемістити ФКВ і через регулятор на приводи системи позиціонування подається керуючий сигнал.

З метою перевірки адекватності даного процесу позиціонування з ідентифікатором була побудована структурна схема системи позиціонування (рис. 3.12).

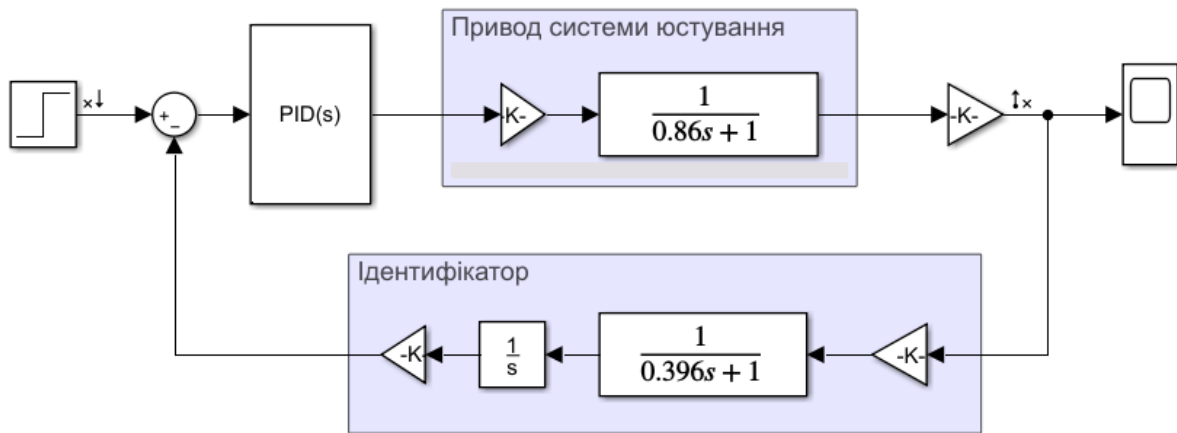


Рисунок 3.12 – Структурна схема системи позиціонування з ідентифікатором

Враховуючи характеристики приводів системи юстування, можна записати його передатну функцію:

$$W_{юст}(s) = \frac{1,07}{0,86s + 1}.$$

Ідентифікатор складається з послідовних ланок фільтра, автозгортки і коефіцієнтів підсилення:

$$W_{юст}(s) = \frac{0,48}{s(0,396s + 1)}.$$

Передатна функція регулятора дорівнює:

$$PID(s) = 3,57 + \frac{0,49}{s} + 3,93 \cdot \frac{200,56}{1 + 200,56/s}.$$

На рис. 3.13 подано перехідну характеристику системи.

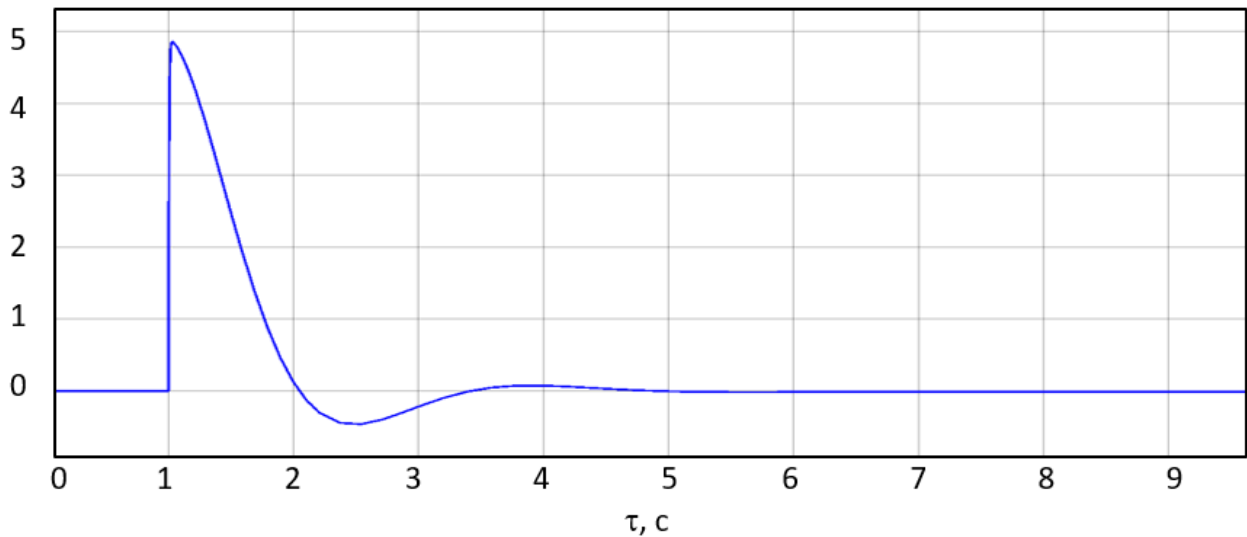


Рисунок 3.13 – Перехідна характеристика системи позиціонування

Імпульсний відгук системи на одиничну імпульсну функцію представлений на рис. 3.14.

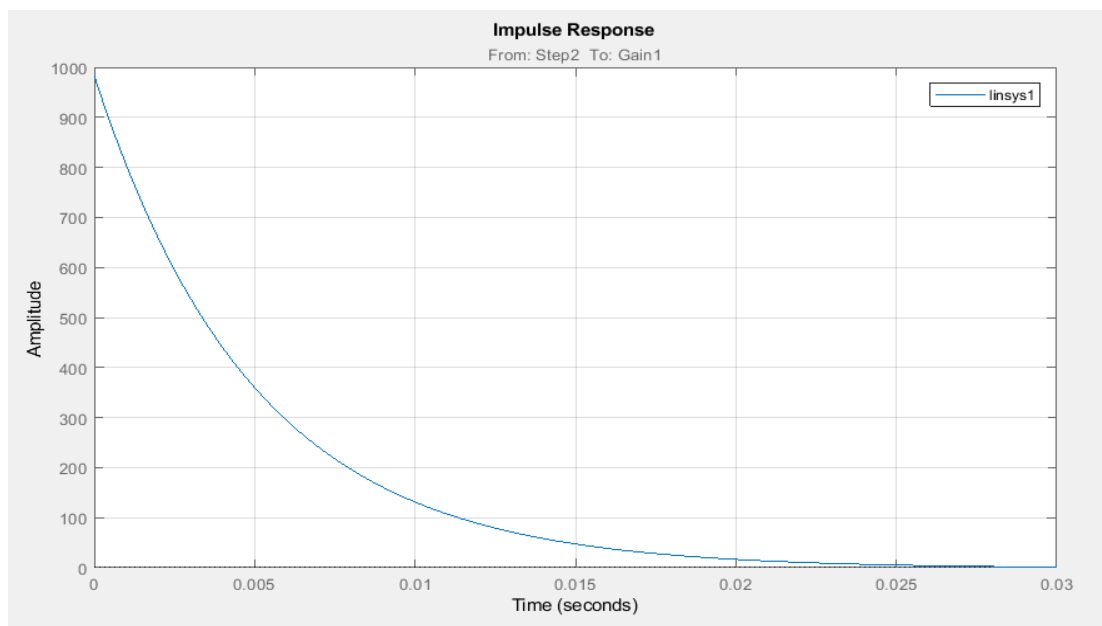


Рисунок 3.14 – Імпульсна характеристика системи позиціонування

З побудованих графіків АЧХ і ФЧХ (рис. 3.15) і діаграми Найквіста (рис. 3.16) можна зробити висновок, що дана система позиціонування є стійкою.

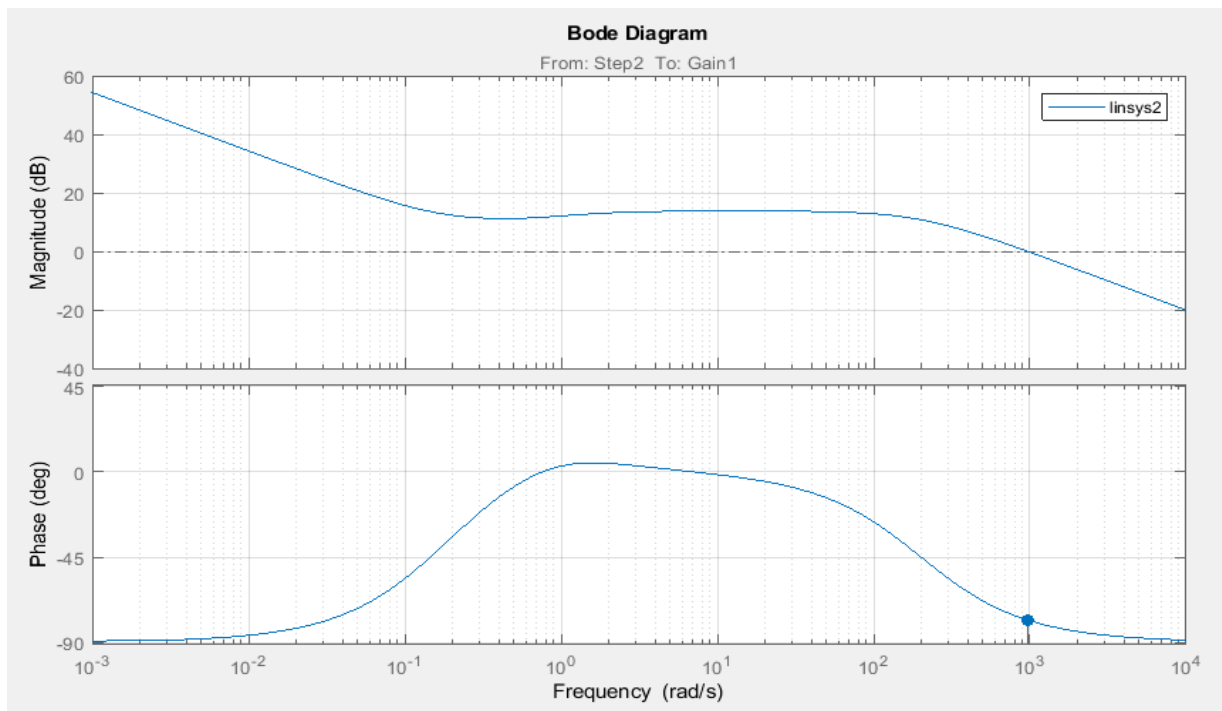


Рисунок 3.15 – АЧХ і ФЧХ системи позиціонування

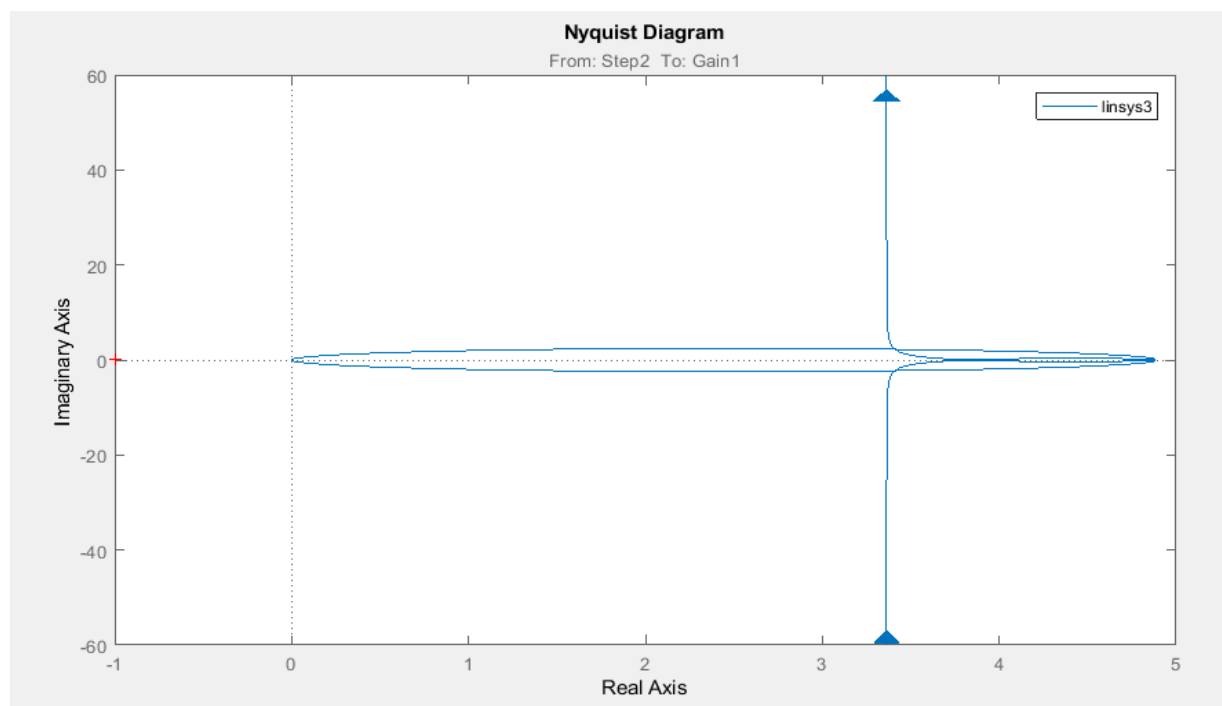


Рисунок 3.16 – Діаграма Найквіста

4 МЕТОД ПРЕЦИЗІЙНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН ЗА КУТОМ ПОВОРОТУ

4.1 Вплив неузгодженості структур поперечного перетину ФКВ на характеристики процесу їх з'єднань

Основною вимогою до якісного з'єднання волокон є низькі втрати на стику. Але внаслідок своєї складної періодичної структури поперечного перетину ФКВ процес позиціонування та з'єднання виявляється набагато трудомістким та потребує більшої точності виконання та контролю, ніж у випадку з'єднання стандартних ОВ.

Як було розглянуто в першому розділі, в випадку виконання зварного з'єднання під впливом високої температури змінюються діаметри отворів та їх розташування в оболонці. А це впливає на оптичні властивості ФКВ, змінюється значення показника заломлення оболонки в місці стику що впливає на дисперсійні та нелінійні властивості волокна. Змінення показника заломлення, в свою чергу, може призвести до повного поглинання випромінювання оболонкою ФКВ або до появи додаткових мод, що є критичним для одномодових волокон. В них на будь-якій довжині хвилі розповсюджується тільки одна мода. Для стандартного волокна існує довжина хвилі відсічки, яка за допомогою V -параметру визначає границю існування одномодового та багатомодового режиму. Критерій одномодового режиму розповсюдження в даному випадку має вигляд

$$V = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{(n_{core}^2 - n_{clad}^2)} < 2,405 , \quad (4.1)$$

де R – радіус серцевини ОВ;

λ – довжина хвилі випромінювання;

n_{core}, n_{clad} – показники заломлення серцевини й оболонки відповідно.

Хвильовий параметр фотонно-кристалічного волокна V_{eff} залежить від періодичної структури отворів в оболонці [80, 86]:

$$V_{eff} = \frac{2\pi D}{\lambda} \sqrt{n_{core}^2(\lambda) - n_{clad}^2(\lambda)}, \quad (4.2)$$

де D – характерний розмір періодичної структури;

$n_{core}(\lambda)$, $n_{clad}(\lambda)$ – показники заломлення фундаментальної моди та першої оболонкової відповідно. Аналогічно тому, як хвильовий параметр може бути використаний, щоб визначити довжину хвилі відсічки з умови $V = 2,405$, довжина хвилі відсічки ФКВ може бути знайдена з наступної умови на хвильовий параметр $V_{eff} = \pi$.

Розподілення областей одномодового та багатомодового режимів у ФКВ залежить від співвідношення нормованої довжини хвилі λ/D і нормованого діаметра отворів в оболонці волокна d/D (рис. 4.1). На рисунку заштрихована область – область повного поглинання випромінювання оболонкою.

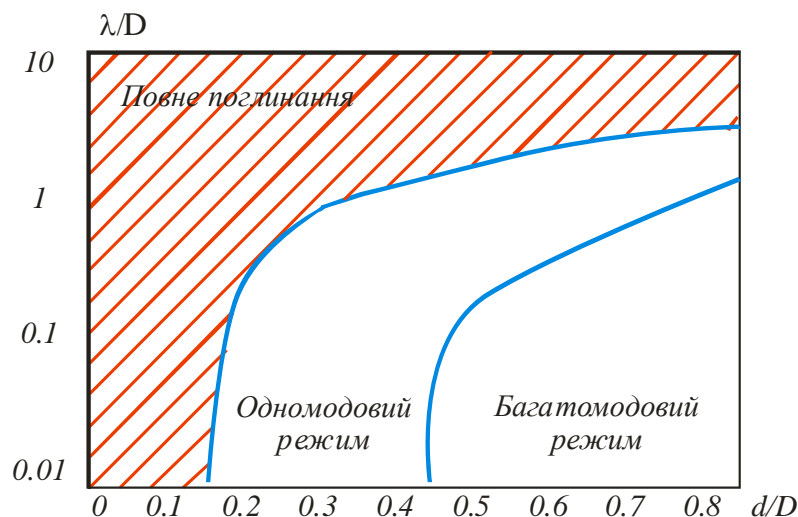


Рисунок 4.1 – Розподілення областей одномодового, багатомодового режимів та режиму повного поглинання випромінювання оболонкою ФКВ в залежності від нормованої довжини хвилі та діаметру отворів в оболонці

Якщо характерний розмір структури отворів, який зручно характеризувати відстанню між отворами $D < \lambda$, то показник заломлення оболонки n_{clad} визначається усередненим значенням показників заломлення двох середовищ з урахуванням відношення їх поперечних перетинів. Оскільки показник заломлення повітря практично дорівнює одиниці, то усереднений показник заломлення оболонки може бути суттєво менше показника заломлення кварцу.

У той же час короткі світлові хвилі ($\lambda < D$) мало проникають в отвори (внаслідок ефекту повного внутрішнього відбиття на границі отворів), і ефективний показник заломлення для них близький до показника заломлення чистого кварцового скла. Таким чином, в області ($\lambda \approx D$) ефективний показник заломлення оболонки ФКВ має сильну спектральну залежність та збільшується для коротких довжин хвиль.

Складний характер розподілу інтенсивності модового поля ФКВ ускладнює аналіз внесеного згасання сигналу. На рис. 4.2 показано розподіли інтенсивності випромінювання для стандартного одномодового волокна (а) та фотонно-кристалічного волокна (б).

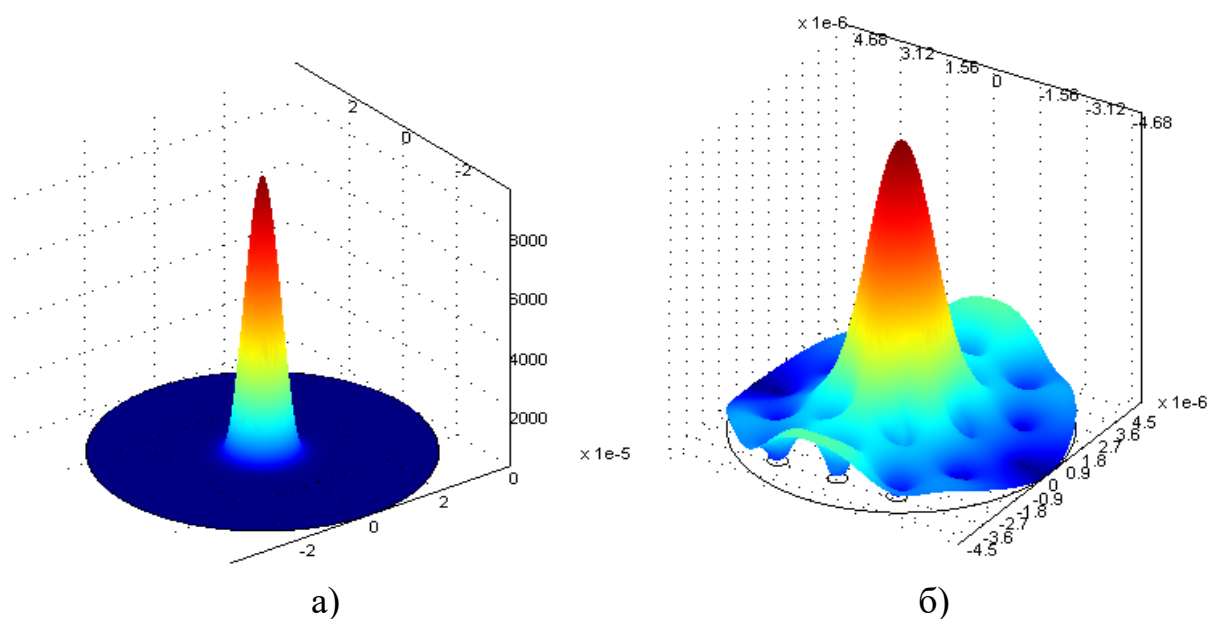


Рисунок 4.2 – Розподіли інтенсивності випромінювання стандартного одномодового волокна (а) та ФКВ (б)

Для стандартного одномодового волокна діаметр модового поля у випадку гаусівського проміння дорівнює ширині кривої розподілу амплітуди оптичного поля на рівні $1/e$ або ширині кривої розподілу оптичної потужності (інтенсивності) в точці $1/e^2$. Для його визначення необхідно знайти залежність потужності, що передається, від зсуву:

$$T = \left| \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(r, \theta) E(r', \theta') r dr d\theta \right|^2, \quad (4.3)$$

де $E(r, \theta)$ і $E(r', \theta')$ – нормалізований розподіл поперечного поля при $T = 1$ і $d = 0$ та поле зі змінною зсуву d в напрямку θ_d відповідно, представлені в циліндричній системі координат.

При вимірюваннях діаметр w_0 модового поля визначається з використанням функцій розподілу ближнього $f(r)$ й дальнього $F(q)$ полів, які визначаються як корінь квадратний зі значення інтенсивності відповідної світлової хвилі, забезпечуючи умову

$$\frac{\left(\int_0^{\infty} r f(r) g(r) dr \right)^2}{\int_0^{\infty} r f^2(r) dr \cdot \int_0^{\infty} r g^2(r) dr} = \frac{\left(\int_0^{\infty} q F(q) G(q) dq \right)^2}{\int_0^{\infty} q F^2(q) dq \cdot \int_0^{\infty} q G^2(q) dq}, \quad (4.4)$$

де r і θ – радіальний зсув та кутова координата в ближній й дальній зонах відповідно;

$$q = \frac{\sin \theta}{\lambda}; \quad g(r) = \frac{2}{w} \exp\left(-\frac{r^2}{w}\right); \quad G(q) = \frac{2}{W} \exp\left(-\frac{q^2}{W}\right).$$

Звідси, визначивши w або W , значення радіуса модового поля w_0 можна встановити, використовуючи співвідношення

$$W = \frac{1}{\pi w}. \quad (4.5)$$

Цей вираз математично еквівалентний мінімізації методом найменших квадратів рівняння:

$$\int_0^{\infty} r [f(r) - g(r)]^2 dr - \int_0^{\infty} q [f(q) - G(q)]^2 dq = 0, \quad (4.6)$$

яка здійснюється в площині, перпендикулярній осі волокна. Дане визначення діаметра модового поля дає співпадаючі результати, як в ближньому, так і в дальньому полі та використовується в процесі вимірювань [87].

Якщо профіль показника заломлення ФКВ не змінюється з відстанню z уздовж волокна, тобто $n = n(x, y)$, то хвилевод являється трансляційно-інваріантним [88]. Електричне та магнітне поле в такому хвилеводі описується суперпозицією полів зі змінними, що розділюються

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{e}(x, y) \exp(j\beta z); \quad \vec{H}(x, y, z) = \vec{h}(x, y) \exp(j\beta z), \quad (4.7)$$

де β – постійна розповсюдження.

Розкладемо ці поля на поздовжні та поперечні складові, які позначимо індексами z та t

$$\vec{E} = (\vec{e}_t + e_z \hat{z}) \exp(j\beta z), \quad \vec{H} = (\vec{h}_t + h_z \hat{z}) \exp(j\beta z), \quad (4.8)$$

де \hat{z} – одиничний вектор, паралельний осі волокна.

Електричне поле в напрямку осі z може бути розраховано використовуючи рівняння Максвелла. Тому основною задачею є визначення поперечного розподілу поля, що складається з двох компонентів по осях x та y

$$\vec{e}_t(x, y) = e_x(x, y) \hat{x} + e_y(x, y) \hat{y} \quad (4.9)$$

Підставивши вираз (4.19) в повне векторне рівняння хвилі, отримаємо таку пару рівнянь хвилі для компонентів електричного поля $e_x(x, y)$ та $e_y(x, y)$:

$$\left[\nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y) - \beta^2 \right] e_x(x, y) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(e_x(x, y) \frac{\partial \ln n^2(x, y)}{\partial x} + e_y(x, y) \frac{\partial \ln n^2(x, y)}{\partial y} \right) \quad (4.10)$$

$$\left[\nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y) - \beta^2 \right] e_y(x, y) = -\frac{\partial}{\partial y} \left(e_x(x, y) \frac{\partial \ln n^2(x, y)}{\partial x} + e_y(x, y) \frac{\partial \ln n^2(x, y)}{\partial y} \right)$$

де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число.

При відношенні діаметра отворів в оболонці ФКВ до відстані між ними $d/D = 0,188$ та довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм ФКВ являється одномодовим. Таким чином, досліджуються властивості фундаментальної моди в цьому волокні. Так як повітряні отвори в оболонці ФКВ мають малі розміри, то можливо використовувати скалярне наближення, що дозволяє проігнорувати праві частини в виразах (4.10), а тому рівняння хвилі для електричного поля матиме вигляд

$$\left[\nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y) - \beta^2 \right] E(x, y) = 0, \quad (4.11)$$

де $E(x, y) = e_x(x, y)$ або $E(x, y) = e_y(x, y)$ – рішення даного рівняння;

$$\nabla_t^2 E(x, y) = \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2}.$$

Рівняння (4.9) та (4.11) визначають просторову залежність $e_t(x, y)$. В загальному випадку функція $e_t(x, y)$ включає в себе як складову $e_x(x, y)$, так і $e_y(x, y)$. Конкретна комбінація визначається поляризаційними властивостями хвилеводу (профілем показника заломлення) та зазвичай може бути визначена з властивостей симетрії поперечного перетину хвилеводу. Якщо знехтувати поляризаційними властивостями хвилеводу, то справедливою буде будь-яка лінійна комбінація, але це може призвести до великих помилок.

Поперечний розподіл електричного поля в перетині волокна можна записати у вигляді розкладу за системою F ортонормованих функцій Ерміта-Гауса [52]

$$e_x(x, y) = \sum_{a,b=0}^F \varepsilon_{ab}^x \psi_a(x) \psi_b(y), \quad e_y(x, y) = \sum_{a,b=0}^F \varepsilon_{ab}^y \psi_a(x) \psi_b(y), \quad (4.12)$$

де $\varepsilon_{ab}^x = \varepsilon_{ab}^y = \varepsilon_{ab}$ – постійні коефіцієнти для скалярного випадку;

$\psi_i(s)$ ($i = a, b, s = x, y$) – елементи функції Ерміта-Гауса:

$$\psi_i(s) = \frac{2^{-i} \pi^{-1/4}}{\sqrt{(2i)! \omega}} \exp\left(-\frac{s^2}{2\omega^2}\right) H_{2i}(s/\omega), \quad (4.13)$$

де $H_{2i}(s/\omega)$ – $2i$ -й порядок полінома Ерміта-Гауса.

Фізичний зміст індексів a та b , що називаються поперечними індексами моди, полягає в тому, що вони показують, скільки разів поле змінює знак відповідно в напрямку x та y . В випадку, коли $a = b = 0$ маємо гаусівський пучок – основну моду вільного простору. Важливо відмітити, що моди всіх порядків характеризуються одним і тим самим масштабним параметром $\omega = D/2$, де D відстань між повітряними отворами в оболонці ФКВ.

У розрахунках використовуються тільки парні порядки поліномів Ерміта. Це обумовлено тим, що фундаментальні моди, які спостерігаються в цих волокнах парні, тому непарні функції, щоб встановити їх непотрібні.

Одним з основних параметрів, який необхідно враховувати при з'єднанні ФКВ є ефективна площа моди волокон [48]

$$A_{eff} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (4.14)$$

де $E(x, y)$ – амплітуда електричного поля.

Підставивши вираз для інтенсивності випромінювання (4.9) в співвідношення (4.14), отримаємо

$$A_{eff} = \frac{2 \left(\pi \omega \sum_{a_1, a_2=0}^{F-1} \varepsilon_{a_1, a_2}^2 \right)}{\sum_{a_1, a_2, \dots, a_8=0}^{F-1} A_{a_1, a_2, \dots, a_8}}, \quad (4.15)$$

де

$$A_{a_1, a_2, \dots, a_8} = \varepsilon_{a_1, a_2} \varepsilon_{a_3, a_4} \varepsilon_{a_5, a_6} \varepsilon_{a_7, a_8} \cdot \sqrt{(2a_1)!(2a_2)!(2a_3)!(2a_4)!(2a_5)!(2a_6)!(2a_7)!(2a_8)!} \cdot \delta_1 \delta_2 \quad (4.16)$$

$$\delta_1 = \sum_{t_1=0}^{\min(2a_1, 2a_3)} \sum_{t_2=0}^{\min(2a_5, 2a_7)} \frac{(2\gamma_1)!}{(-4)^{\gamma_1} \gamma_1! t_1! (2a_1 - t_1)! (2a_3 - t_1)! t_2! (2a_5 - t_2)! (2a_7 - t_2)!} \quad (4.17)$$

$$\delta_2 = \sum_{t_1=0}^{\min(2a_2, 2a_4)} \sum_{t_2=0}^{\min(2a_6, 2a_8)} \frac{(2\gamma_2)!}{(-4)^{\gamma_2} \gamma_2! t_1! (2a_2 - t_1)! (2a_4 - t_1)! t_2! (2a_6 - t_2)! (2a_8 - t_2)!} \quad (4.18)$$

$$\gamma_1 = a_1 + a_3 + a_5 + a_7 - t_1 - t_2, \quad \gamma_2 = a_2 + a_4 + a_6 + a_8 - t_1 - t_2 \quad (4.19)$$

Обчисливши значення ефективних площ модових полів для двох волокон, що з'єднуються A_{eff1}, A_{eff2} , можна визначити втрати, викликані їх різницею. Показником якості з'єднання являється коефіцієнт передачі оптичного сигналу з одного волокна в інше. В випадках відсутності зміщень в з'єднанні, він може бути визначений приблизно таким чином [26]:

$$T \approx \frac{4A_{eff1} \cdot A_{eff2}}{(A_{eff1} + A_{eff2})^2}. \quad (4.20)$$

Підставивши в даний вираз формули для обчислення ефективних площ мод волокон, що з'єднуються, (3.15) і перетворивши його, отримаємо

$$T \approx \frac{2 \sum_{a_1, a_2, \dots, a_8}^{F-1} A_{a_1, a_2, \dots, a_8} \left(\omega_b \sum_{b_1, b_2=0}^{F-1} \varepsilon_{b_1, b_2}^2 \right)^2 \sum_{b_1, b_2, \dots, b_8}^{F-1} A_{b_1, b_2, \dots, b_8} \left(\omega_a \sum_{a_1, a_2=0}^{F-1} \varepsilon_{a_1, a_2}^2 \right)^2}{\left[\sum_{a_1, a_2, \dots, a_8}^{F-1} A_{a_1, a_2, \dots, a_8} \left(\omega_b \sum_{b_1, b_2=0}^{F-1} \varepsilon_{b_1, b_2}^2 \right)^2 + \sum_{b_1, b_2, \dots, b_8}^{F-1} A_{b_1, b_2, \dots, b_8} \left(\omega_a \sum_{a_1, a_2=0}^{F-1} \varepsilon_{a_1, a_2}^2 \right)^2 \right]^2} \quad (4.21)$$

Втрати в цьому випадку можна визначити за формулою [56]

$$\alpha = -10 \lg(T). \quad (4.22)$$

Якщо з'єднуються два ідентичних волокна з однаковим розподілом модового поля, то коефіцієнт передачі в ідеальному випадку буде дорівнювати одиниці, а втрати, відповідно, нулю. Однак на практиці такі значення не досяжні внаслідок різних факторів, які впливають на якість з'єднання. Найсуттєвішими за внесеними втратами можна відзначити поперечне, кутове та поздовжнє зміщення.

Для визначення втрат, викликаних внаслідок геометричної неузгодженості ФКВ у з'єднаннях частіше використовують такий параметр, як розмір модового поля.

Якщо прийняти, що розподіл основної моди ФКВ описується функцією Гауса, то розмір модового поля w може бути розрахований, як радіус Петермана I [17]:

$$\frac{w}{a_{eff}} = \left(\frac{2 \int_0^{\infty} R^3 E^2(R) dR}{\int_0^{\infty} R E^2(R) dR} \right)^{1/2}, \quad (4.23)$$

де $R = r/a$, $a = d/2$ – радіус повітряних отворів в оболонці ФКВ;

$a_{eff} = 0,64D$ – радіус серцевини ФКВ;

D – відстань між отворами в оболонці;

Враховуючи, що

$$E(R) = \frac{1}{J_0(U_{eff})} J_1(RU_{eff}), \text{ якщо } R < 1;$$

$$E(R) = \frac{1}{K_0(W_{eff})} K_1(RW_{eff}), \text{ якщо } R > 1,$$

отримаємо радіус модового поля

$$w = \sqrt{2} a_{eff} \left(\frac{I_1 + I_3}{I_2 + I_4} \right)^{1/2}, \quad (4.24)$$

де інтеграли дорівнюватимуть:

$$I_1 = \frac{1}{J_0^2(U_{eff})_0} \int_0^1 R^3 J_1^2(U_{eff} R) dR = \frac{J_1(U_{eff})^2 + J_2(U_{eff})^2}{6J_0^2(U_{eff})}; \quad (4.25)$$

$$I_2 = \frac{1}{J_0^2(U_{eff})_1} \int_1^\infty R J_1^2(U_{eff} R) dR = \frac{J_1(U_{eff})^2 - J_0(U_{eff})J_2(U_{eff})}{2J_0^2(U_{eff})}; \quad (4.26)$$

$$I_3 = \frac{1}{K_0^2(W_{eff})_1} \int_1^\infty R^3 K_1^2(W_{eff} R) dR = \frac{K_2(W_{eff})^2 - K_1(W_{eff})^2}{6K_0^2(W_{eff})}; \quad (4.27)$$

$$I_4 = \frac{1}{K_0^2(W_{eff})_1} \int_1^\infty R K_1^2(W_{eff} R) dR = \frac{K_0(W_{eff})K_2(W_{eff}) - K_1(W_{eff})^2}{2K_0^2(W_{eff})}, \quad (4.28)$$

де J_0, J_1, J_2 – функції Бесселя першого роду нульового, першого та другого порядків;

K_0, K_1, K_2 – модифіковані функції Бесселя другого роду нульового, першого та другого порядків;

$$U_{eff} = k_0 a_{eff} \sqrt{n_{core}^2 - n_{eff}^2}; \quad (4.29)$$

$$W_{eff} = k_0 a_{eff} \sqrt{n_{eff}^2 - n_{clad}^2}, \quad (4.30)$$

де n_{core} – показник заломлення серцевини ФКВ (кварцу);

n_{clad} – ефективний показник заломлення оболонки ФКВ;

$$n_{eff} \cong \bar{n} + (n_{core} - \bar{n}) \cosh^{-2}(\lambda / D);$$

$$\bar{n} = \lim_{\lambda \gg D} n_{clad} = f n_{air} + (1 - f) n_{core};$$

$$f = \pi / (2\sqrt{3})(d / D)^2;$$

n_{air} – показник заломлення повітря.

Втрати при поперечному зсуві волокон можна вирахувати за формулою

$$\alpha_t = -10 \lg \left(\frac{4w_1^2 w_2^2}{(w_1^2 + w_2^2)^2} \exp \left(-\frac{2r_d^2}{w_1^2 + w_2^2} \right) \right), \quad (4.31)$$

де $r_d = (d_x^2 + d_y^2)^{1/2}$ – поперечне зміщення двох волокон, мкм;

w_1, w_2 – їх радіуси модових полів, мкм.

Втрати при поздовжньому зміщенні волокон можна визначити

$$\alpha_l = -10 \lg \left(\frac{4w_1^2 w_2^2}{\frac{l^2}{k_0^2} + (w_1^2 + w_2^2)^2} \right), \quad (4.32)$$

де l – поздовжнє зміщення волокон, мкм;

$$k_0 = 2\pi/\lambda.$$

Втрати при кутовому зміщенні визначаються за формулою

$$\alpha_\theta = -10 \lg \left(\frac{4w_1^2 w_2^2}{(w_1^2 + w_2^2)^2} \exp \left(-\frac{k^2 \theta^2 w_1^2 w_2^2}{2(w_1^2 + w_2^2)} \right) \right), \quad (4.33)$$

де θ – кутове зміщення волокон, град

$$k = \sqrt{k_0^2 n_{core}^2 - \beta^2}.$$

Структура ФКВ відрізняється від структури звичайного оптичного волокна. В звичайному ОВ є стандартний діаметр серцевини, тоді як діаметр серцевини ФКВ може змінюватися, залежно від області застосування.

В табл. 4.1 представлено характеристики використаних в моделюванні оптичних волокон.

Таблиця 4.1 – Характеристики використаних в моделюванні оптичних ВОЛОКОН

| Зображення | Радіус сердцевини, мкм | Діаметр отворів в оболонці ФКВ, мкм | Відстань між отворами, мкм | Показник заломлення оболонки | Показник заломлення сердцевини | Постійна розповсюдження, $\times 10^6$ 1/м | Радіус модового поля w , мкм |
|----------------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| PCF-10 (рис. 4.3) | 5 | 2,142 | 7,14 | 1,4473 | 1,46 | 2,11 | 10,23 |
| PCF-40 (рис. 4.4) | 19,7 | 6,402 | 13,2 | 1,4455 | 1,4457 | 5,86 | 20,65 |
| PCF-60 (рис. 4.5) | 31,5 | 6,402 | 13,2 | 1,4455 | 1,4457 | 5,86 | 32,84 |
| SMF (рис. 4.6) | 5 | - | - | 1,438 | 1,446 | 5,87 | 6,2 |

На рис. 4.3-4.5 показані змодельовані поперечні перетини ФКВ та отримані відповідні до них розподіли поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм [73]. На рис. 4.6 представлено стандартне одномодове оптичне волокно з радіусом сердцевини $r = 5$ мкм.

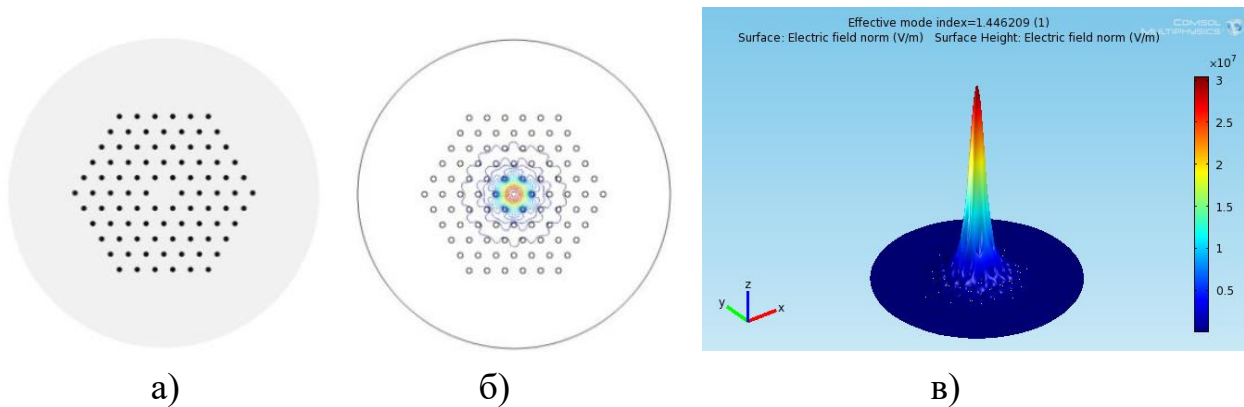


Рисунок 4.3 – Структура ФКВ з діаметром сердцевини 10 мкм (а) та отриманий розподіл поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм (б, в)

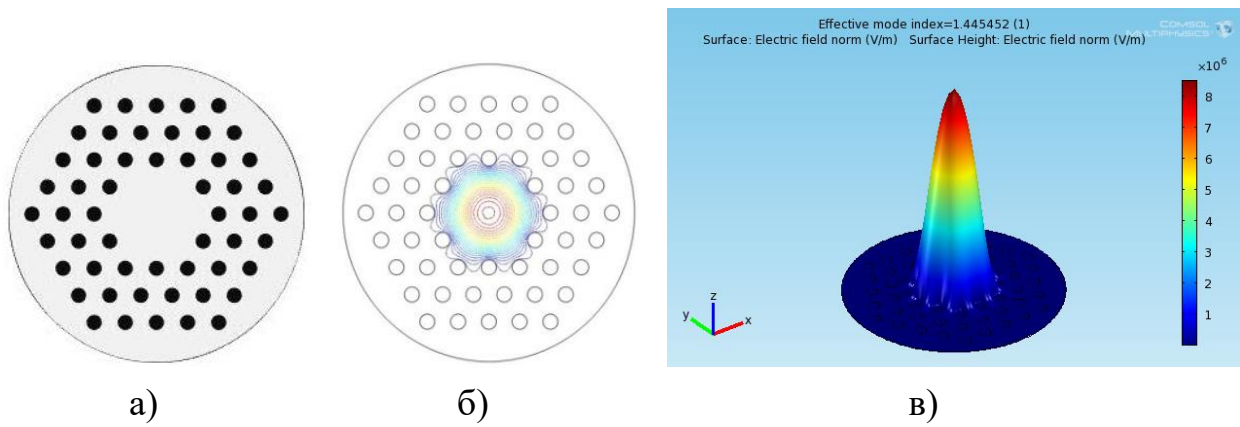


Рисунок 4.4 – ФКВ з діаметром серцевини 40 мкм (а) та отриманий розподіл поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм (б, в)

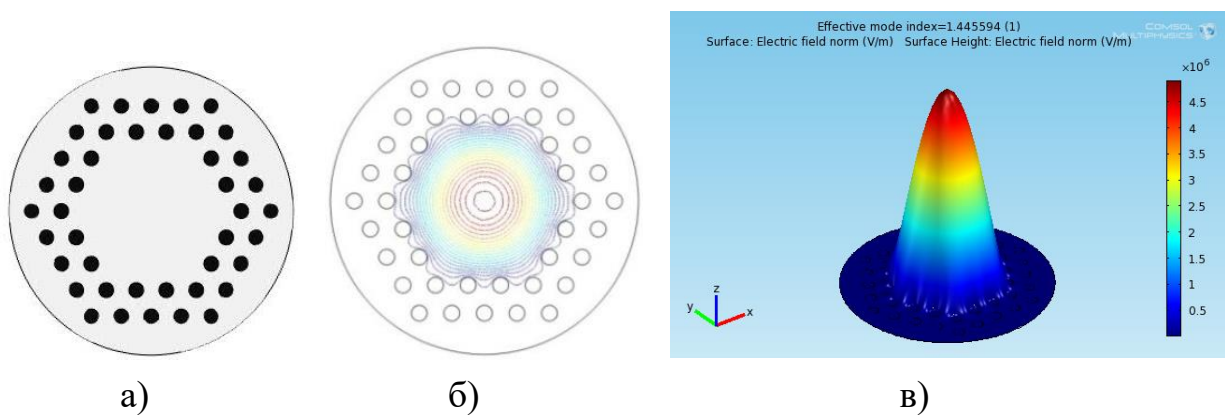


Рисунок 4.5 – ФКВ з діаметром серцевини 60 мкм (а) та отриманий розподіл поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм (б, в)

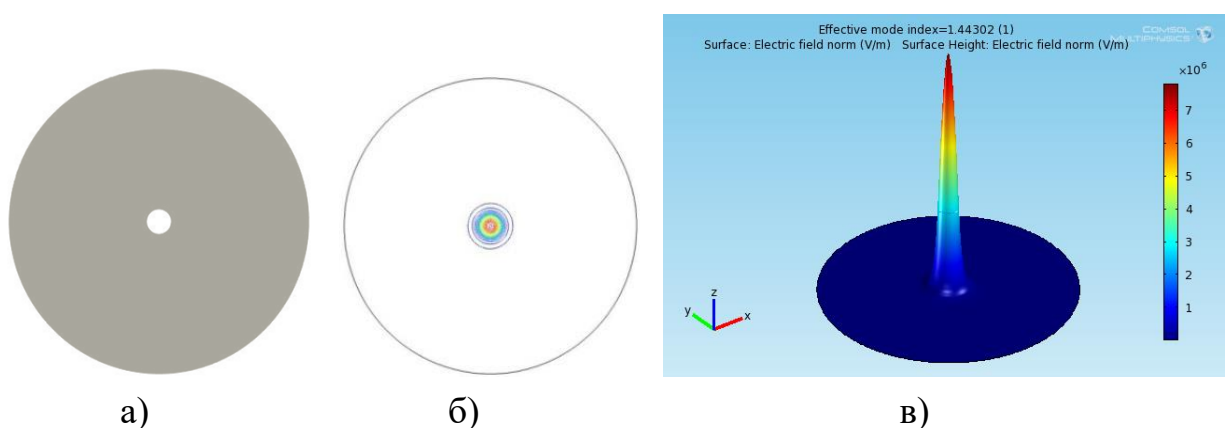


Рисунок 4.6 – Одномодове ОВ з радіусом серцевини $r = 5$ мкм (а) та розподіл поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм (б, в)

За формулами (4.31-4.33.) було розраховано втрати оптичного сигналу для різних комбінацій з'єднань ФКВ між собою та зі стандартним ОВ, які виникають внаслідок впливу зміщень [49, 64]. Досліджувалися:

- залежність втрат від поперечного зсуву, поздовжнього та кутового зміщення в з'єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 5 мкм та одномодового оптичного волокна;

- залежність втрат від поперечного зсуву, поздовжнього та кутового зміщення в з'єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 19,7 мкм та одномодового оптичного волокна;

- залежність втрат від поперечного зсуву, поздовжнього та кутового зміщення в з'єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 31,5 мкм та одномодового оптичного волокна;

- залежність втрат від поперечного зсуву, поздовжнього та кутового зміщення в з'єднаннях ідентичних фотонно-кристалічних волокон.

За результатами розрахунків побудовано графіки залежностей втрат від величин розузгоджень між волокнами, що з'єднуються (рис. 4.7-4.18).

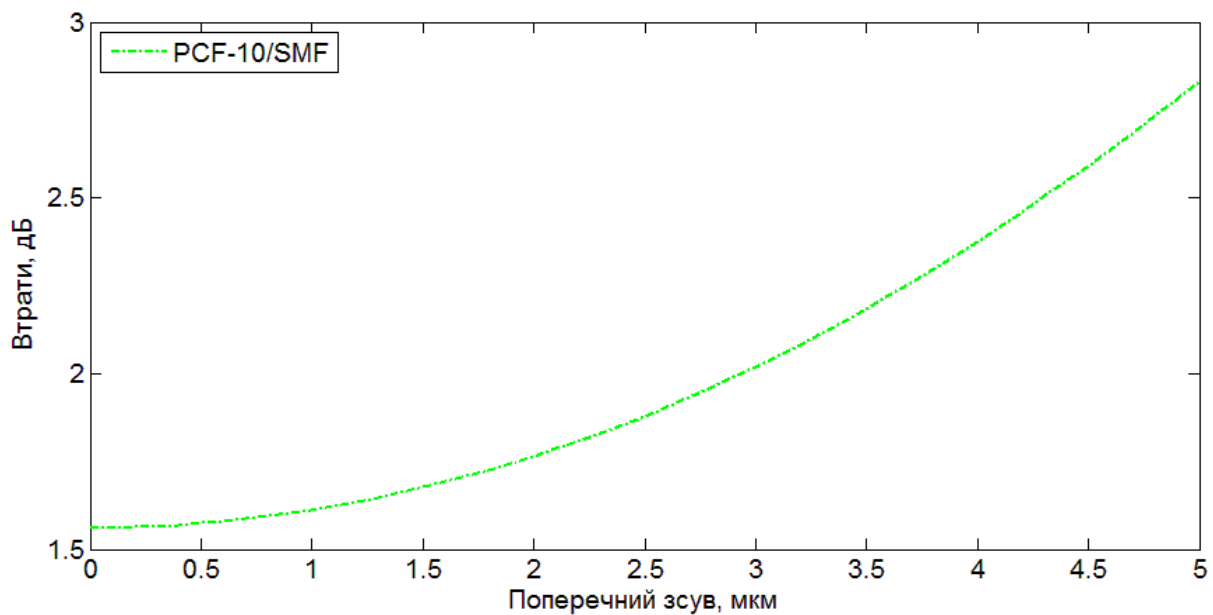


Рисунок 4.7 – Залежність втрат від поперечного зсуву в з'єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 5 мкм та одномодового оптичного волокна

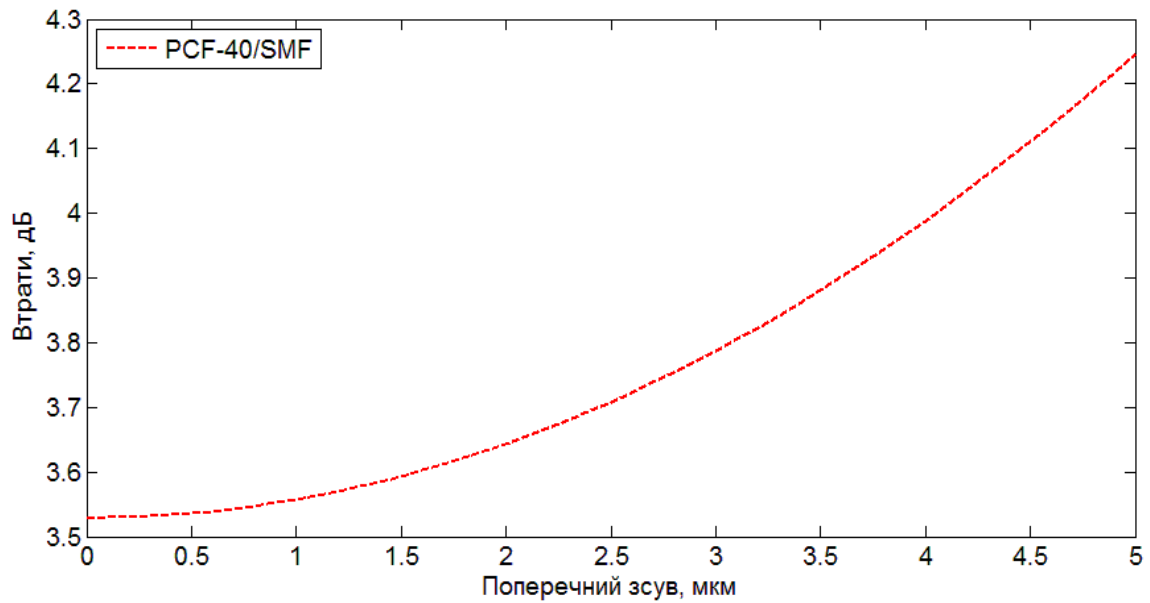


Рисунок 4.8 – Залежність втрат від поперечного зсуву в з’єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 19,7 мкм та одномодового оптичного волокна

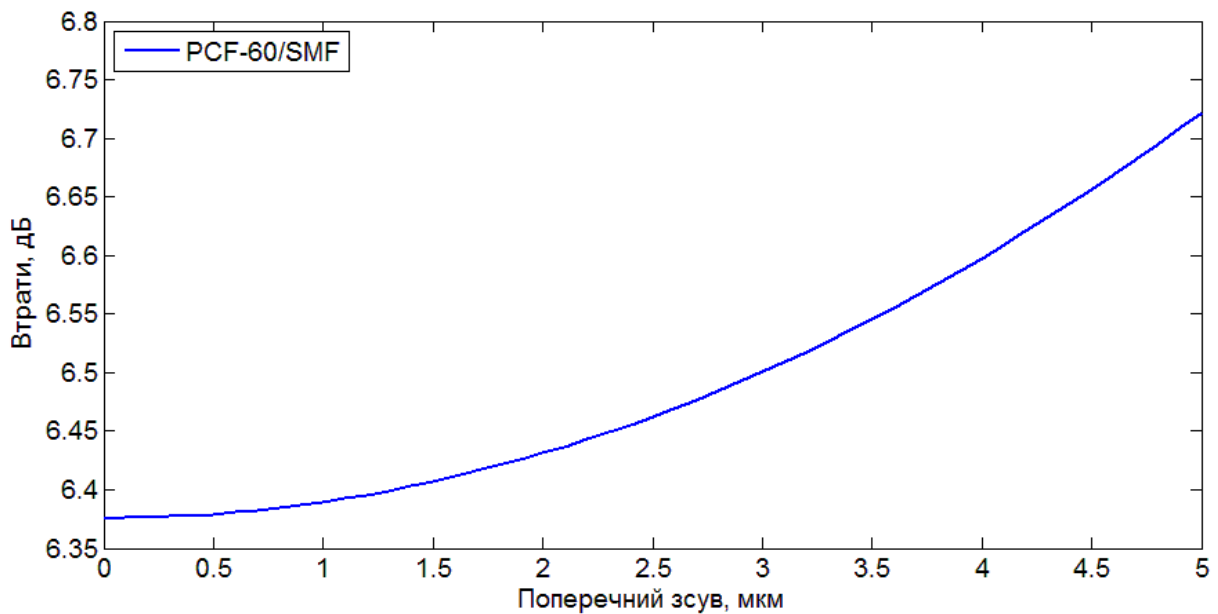


Рисунок 4.9 – Залежність втрат від поперечного зсуву в з’єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 31,5 мкм та одномодового оптичного волокна

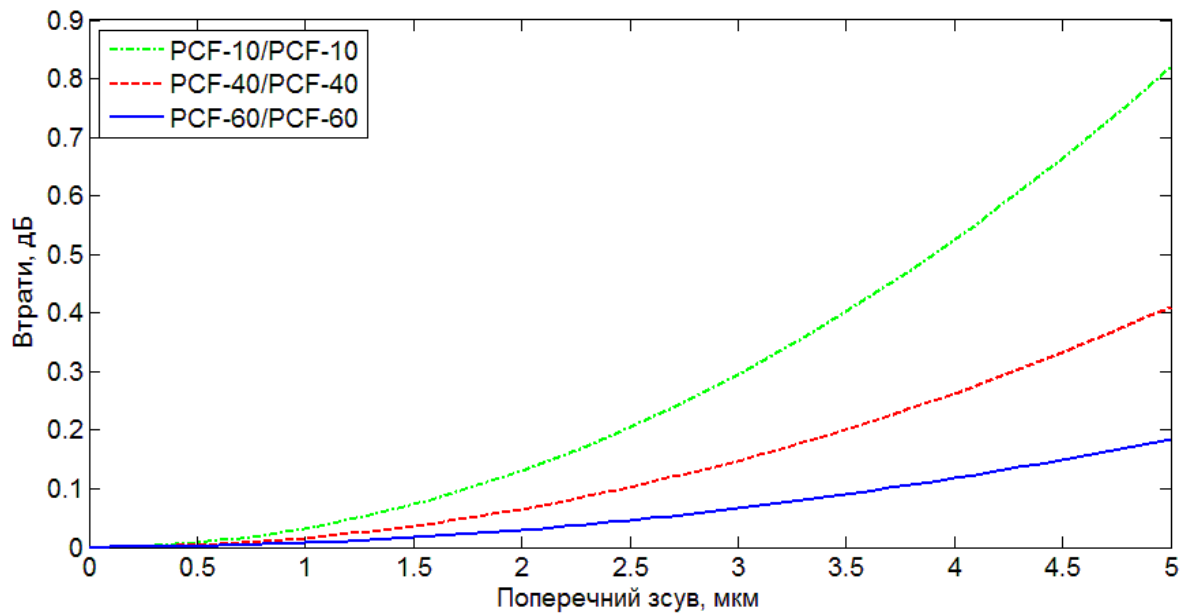


Рисунок 4.10 – Залежність втрат від поперечного зсуву в з’єднаннях ідентичних фотонно-кристалічних волокон

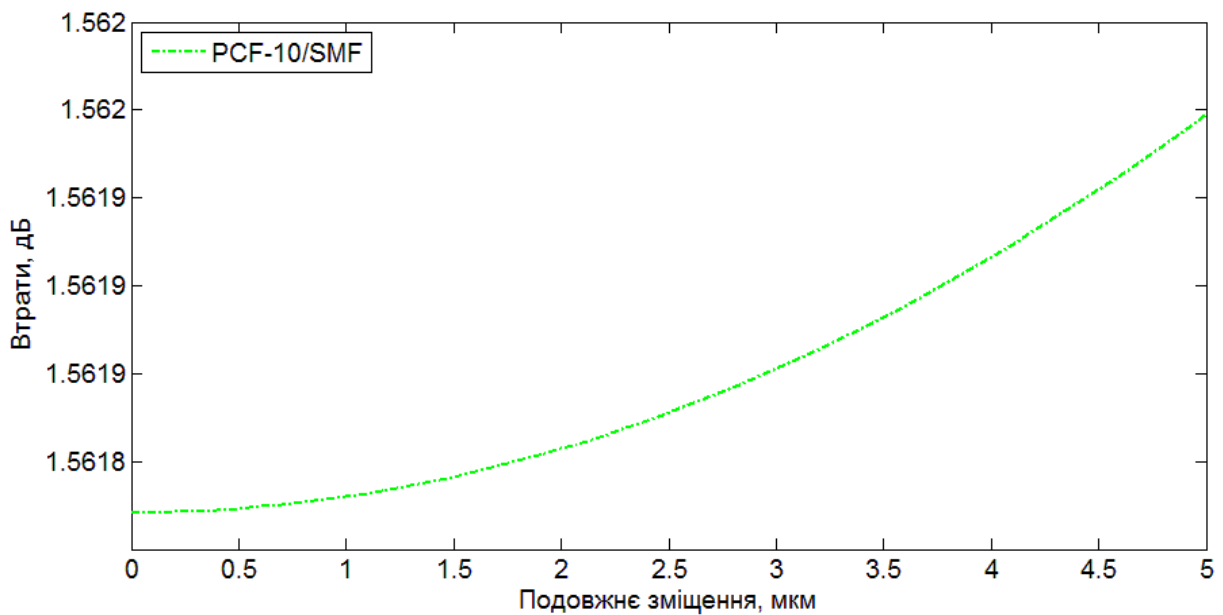


Рисунок 4.11 – Залежність втрат від подовжнього зміщення в з’єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 5 мкм та одномодового оптичного волокна

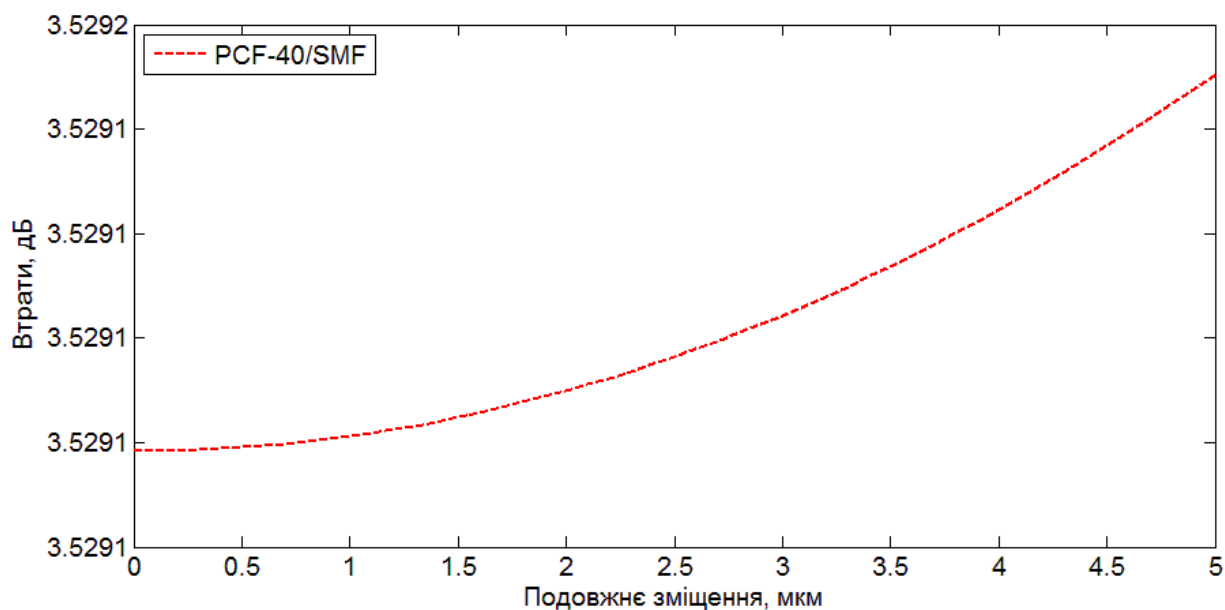


Рисунок 4.12 – Залежність втрат від поздовжнього зміщення в з'єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 19,7 мкм та одномодового оптичного волокна

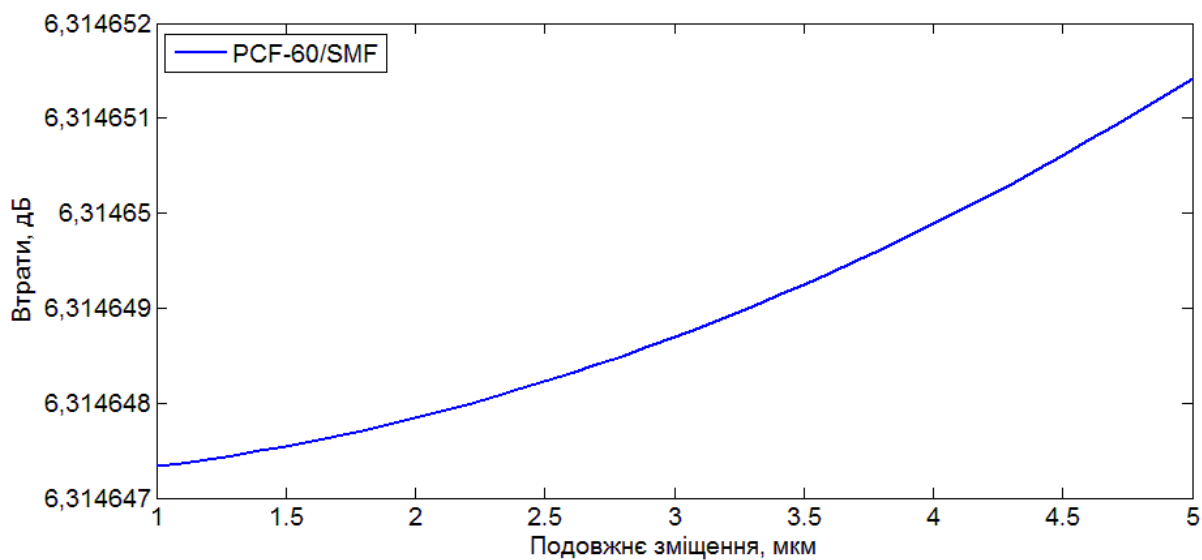


Рисунок 4.13 – Залежність втрат від поздовжнього зміщення в з'єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 31,5 мкм та одномодового оптичного волокна

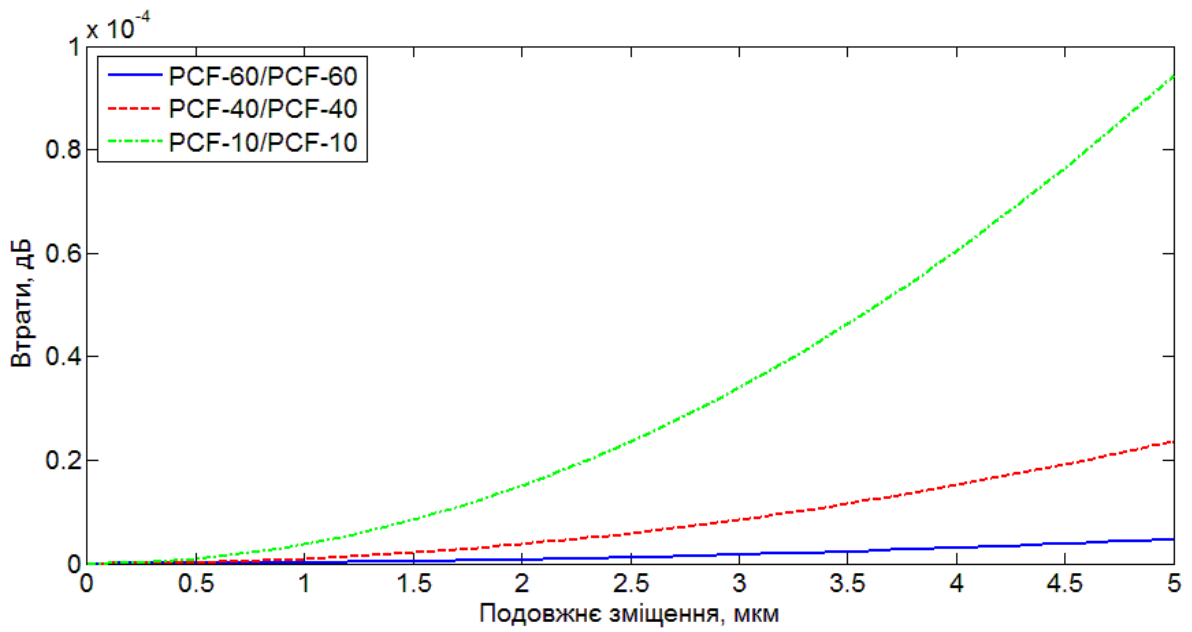


Рисунок 4.14 – Залежність втрат від подовжнього зміщення в з’єднаннях ідентичних фотонно-кристалічних волокон

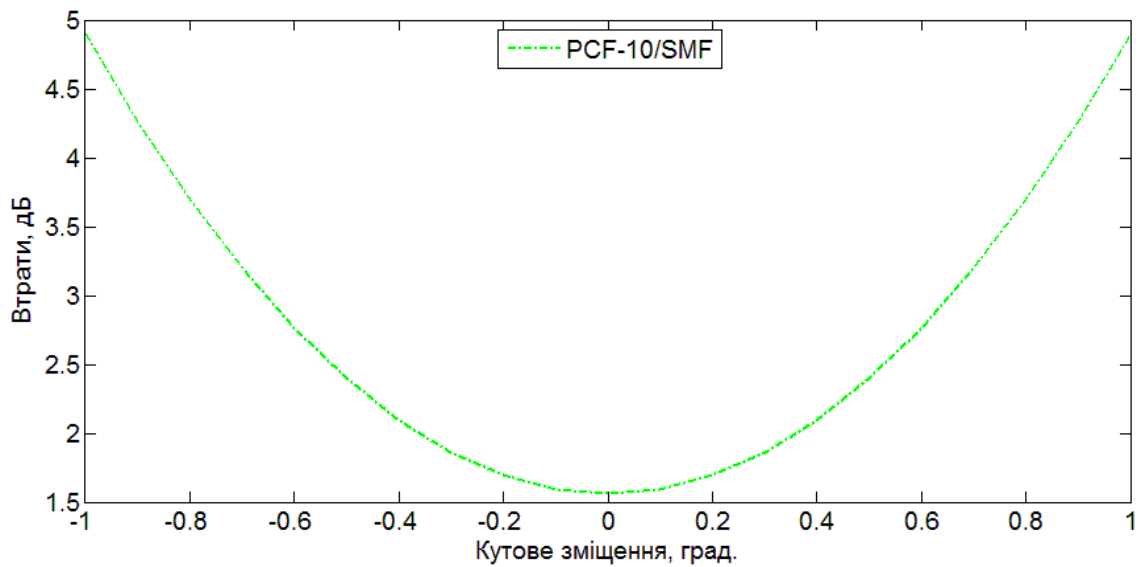


Рисунок 4.15 – Залежність втрат від кутового зміщення в з’єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 5 мкм та одномодового оптичного волокна

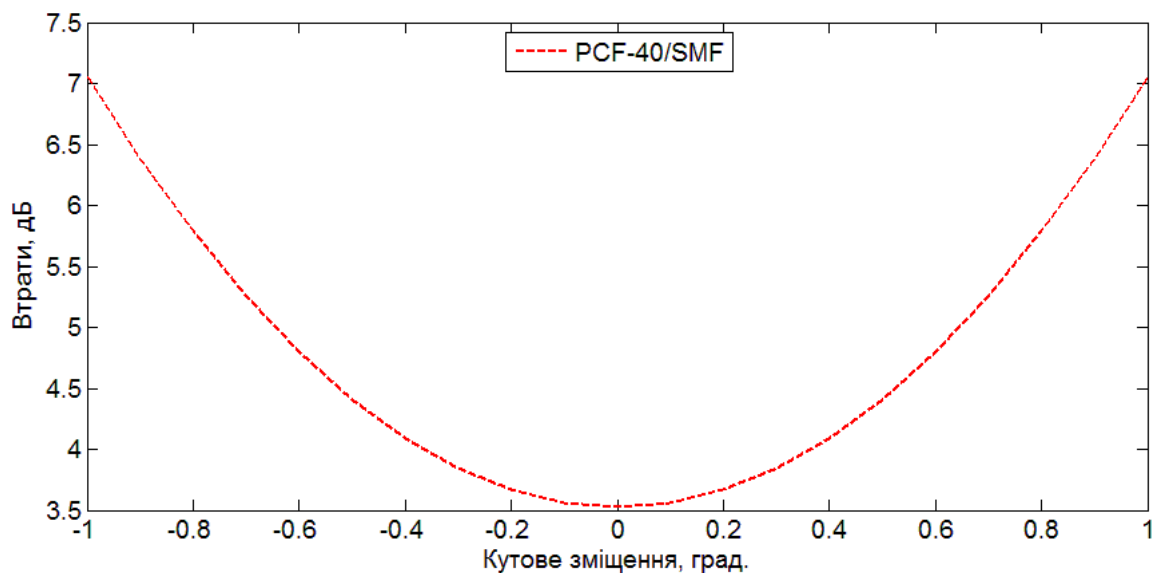


Рисунок 4.16 – Залежність втрат від кутового зміщення в з’єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 19,7 мкм та одномодового оптичного волокна

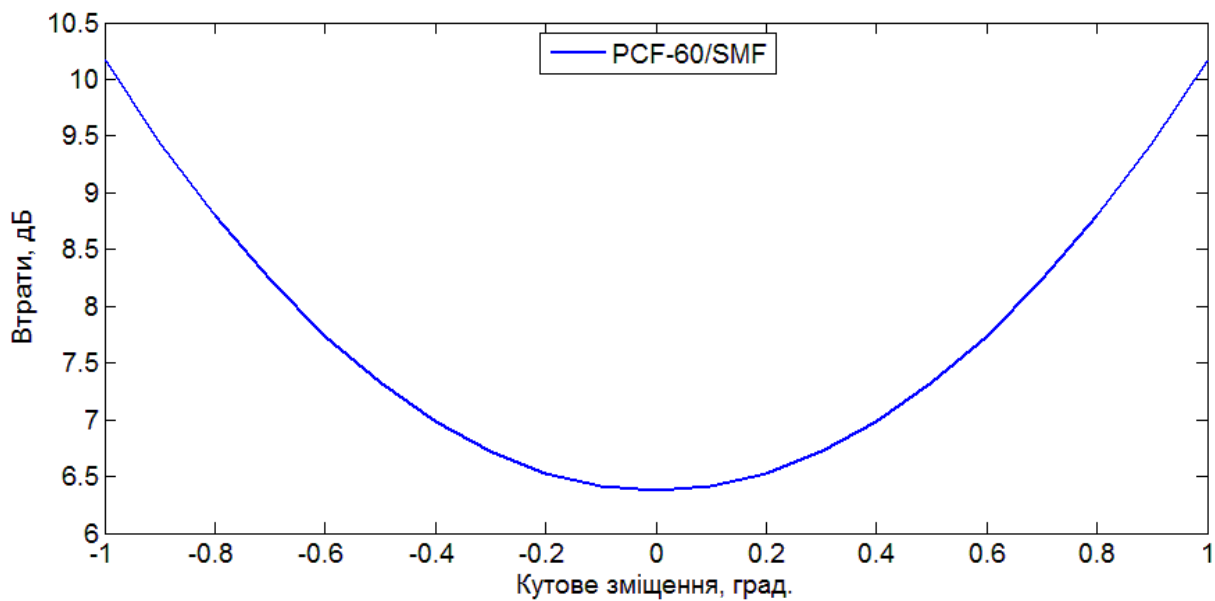


Рисунок 4.17 – Залежність втрат від кутового зміщення в з’єднанні фотонно-кристалічного волокна з радіусом серцевини 31,5 мкм та одномодового оптичного волокна

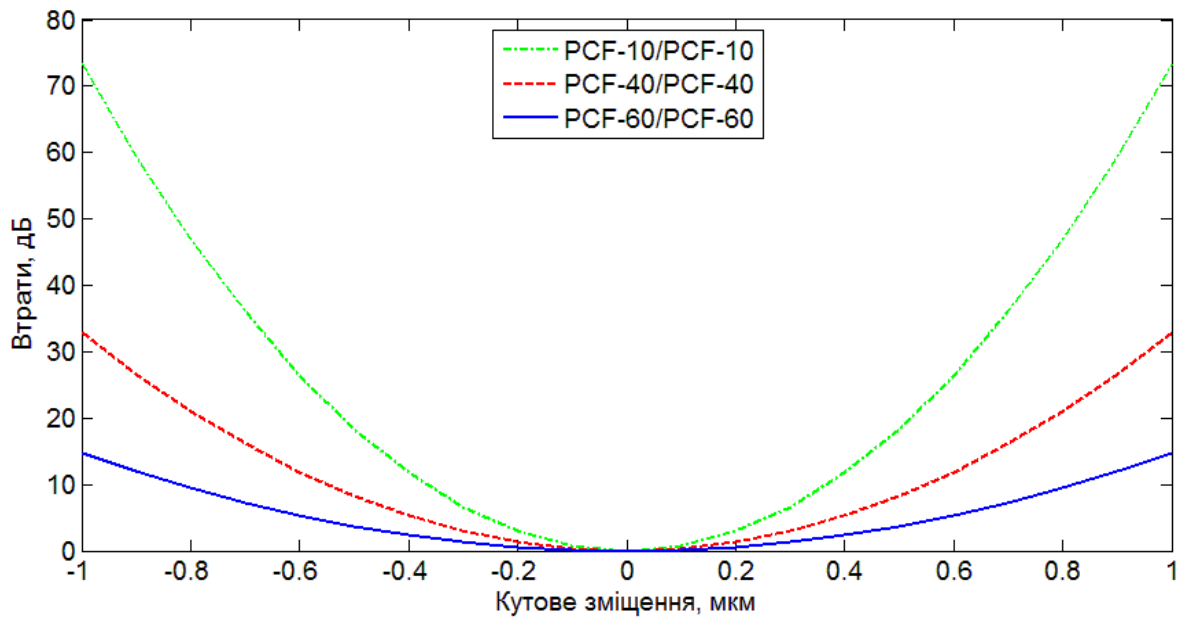


Рисунок 4.18 – Залежність втрат від кутового зміщення в з'єднаннях ідентичних фотонно-кристалічних волокон

Проаналізувавши отримані графіки залежностей втрат оптичного сигналу від погрешностей з'єднання оптичних волокон, можна зробити певні висновки.

По-перше, в з'єднаннях ФКВ зі стандартним оптичним волокном спостерігається типова картина втрат у волокнах з різними діаметрами модового поля. В даних дослідженнях припускалося, що світло проходить у напрямку з ФКВ до стандартного ОВ, тобто з волокна з більшим діаметром модового поля до волокна з меншим діаметром модового поля. Тому зі збільшенням діаметру сердеччини ФКВ збільшуються втрати сигналу у місці стику. Найбільший вплив має кутова складова втрат, які досягають значень 2,5-7 дБ при значеннях кутового зміщення до $0,5^\circ$. Втрати при поперечному та поздовжньому зміщеннях сягають 1,5...6,5 дБ при зміщеннях до 3 мкм.

По-друге, в з'єднаннях ідентичних фотонно-кристалічних волокнах спостерігається ріст затухання сигналу зі зменшенням діаметру сердеччини волокна, тобто ФКВ з маленькою сердечвиною є більш чутливі до зміщень різного роду. Але найбільші значення втрат спостерігаються при кутовому зміщенні та досягають від 3 дБ для ФКВ з сердечвиною 31,5 мкм до 20 дБ для ФКВ з сердечвиною 5 мкм (при кутовому зміщенні до $0,5^\circ$). При поперечному та поздовжньому зсувах до 3 мкм втрати не перевищують 0,3 дБ.

4.2 Метод визначення положення координат центру модового поля фотонно-кристалічного волокна та його максимального діаметру

Процес позиціонування та з'єднання ФКВ є більш складним ніж процес з'єднання стандартних ОВ. Крім геометричних відхилень між волокнами, для ФКВ існують специфічні фактори втрат, які відсутні в з'єднаннях стандартних ОВ. Це пов'язано зі структурою ФКВ, в оболонці якого є повітряні отвори малого діаметру. Через ці отвори модове поле, сформоване ФКВ, на відміну від модового поля стандартного ОВ, має складну форму у поперечному перетині [63, 69]. На рис. 4.19 можна побачити затікання модового поля на оболонку поміж отворами внутрішнього (першого) кола.

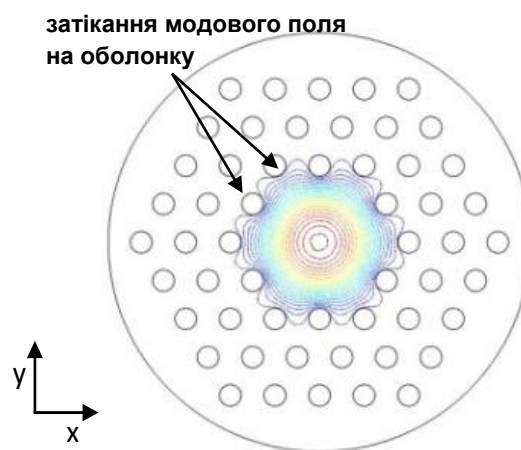


Рисунок 4.19 – Поперечний перетин ФКВ та отриманий розподіл поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$

Під час виконання зварного з'єднання ці отвори деформуються під впливом високої температури, що призводить до змінення модового поля та, як наслідок, збільшення оптичних втрат на стику. Також під час з'єднання двох ФКВ між собою необхідно враховувати кут їх взаємного повороту навколо поздовжньої осі, тобто бажано досягти того, щоб повітряні отвори в оболонці одного ФКВ співпадали з отворами в оболонці іншого ФКВ. Це збільшить площу перекриття модових полів обох волокон, що мінімізує втрати корисного сигналу.

Тому важливою задачею є визначення положення перетину ФКВ, в якому діаметр модового поля буде максимальним. Це дасть можливість виконувати

з'єднання двох ФКВ з меншими втратами оптичної потужності на стику, які пов'язані з неузгодженістю модових полів. Визначення максимального діаметру модового поля пропонується проводити за наступним алгоритмом (рис. 4.20).

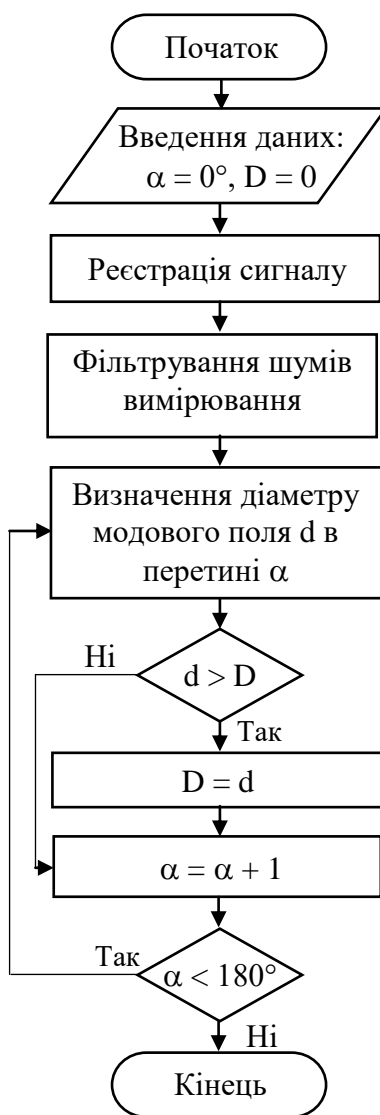


Рисунок 4.20 – Алгоритм визначення максимального діаметру модового поля в поперечному перетині ФКВ

Пропонується така послідовність дій:

- отримання зображення модового поля;
- фільтрування зображення з метою зменшення впливу шумів на точність розрахунків;
- визначення центру розподілу модового поля методом автозгортки;

- визначення діаметру модового поля для кожного з перетинів, які проходять через центр розподілу;

- визначення перетину, в якому діаметр модового поля буде максимальним.

Для проведення досліджень було програмно побудовано модель ФКВ з радіусом серцевини 19,7 мкм, діаметром отворів в оболонці 6,4 мкм та відстанню між отворами 13,2 мкм. Після чого отримано розподіл модового поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм (рис. 4.21).

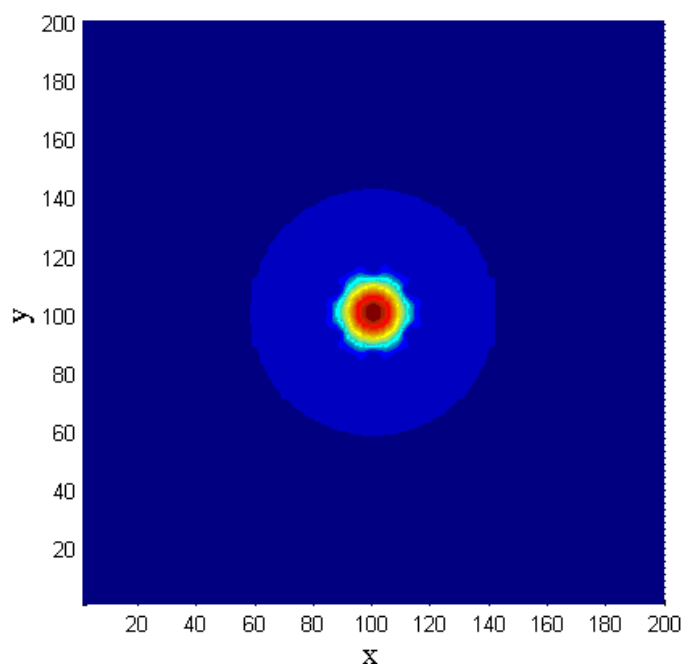


Рисунок 4.21 – Розподіл інтенсивності модового поля в поперечному перетині ФКВ

Зменшення похибки обчислень реалізовано фільтрацією отриманого розподілу модового поля за рахунок використання фільтра Баттерворта нижніх частот четвертого порядку та нормованою частотою зрізу $w=0,5\pi$ рад/с. Після фільтрування, розподіл інтенсивності модового поля нормується до одиниці (рис. 4.22) та підлягає подальшій обробці.

Для визначення центру розподілу інтенсивності модового поля використано функцію двовимірної автозгортки цього розподілу (рис. 4.23) [63]:

$$s(\tau, \nu) = I(x, y) ** I(x, y) = \int_{x_1 y_1}^{x_2 y_2} I(x, y) I(\tau - x; \nu - y) dx dy. \quad (4.34)$$

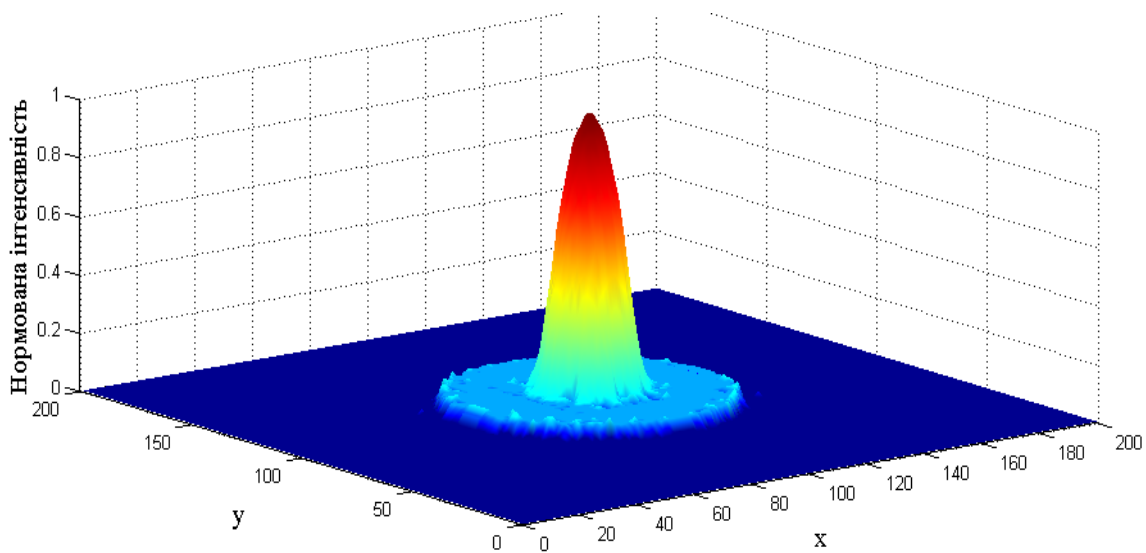


Рисунок 4.22 – Розподіл інтенсивності модового поля нормований до одиниці після операції фільтрування

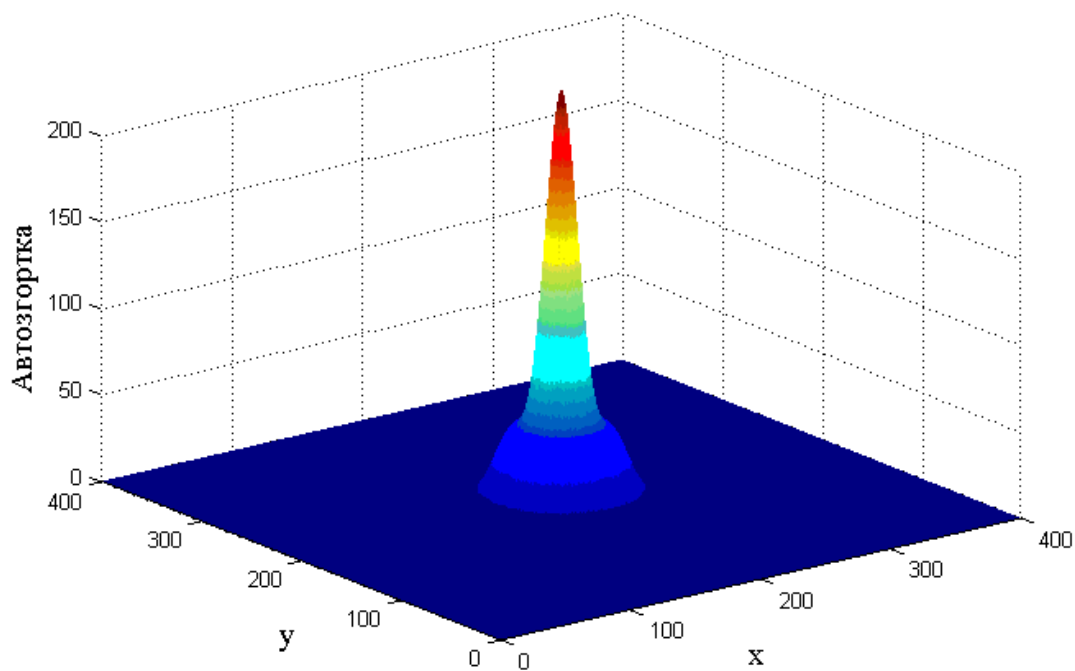


Рисунок 4.23 – Автозгортка розподілу інтенсивності модового поля (розраховані координати максимального значення автозгортки $x=200$, $y=200$)

Координати максимуму автозгортки відповідають подвоєним координатам центру розподілу інтенсивності модового поля. Тобто отримані координати максимуму автозгортки (200, 200) визначають координати центру розподілу інтенсивності модового поля у точці (100,100).

Щоб знайти перетин, в якому діаметр модового поля буде максимальним, задамо рівняння перетину, що проходить через центр розподілу модового поля:

$$y(x) = y_0 + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (x - x_0), \quad (4.35)$$

де x_0 ; y_0 – координати центру розподілу модового поля, які знайдено методом автозгортки;

$\alpha = 0 \dots 180^\circ$ – кут нахилу перетину (змінюється з кроком в один градус для кожного перетину) (рис. 4.24).

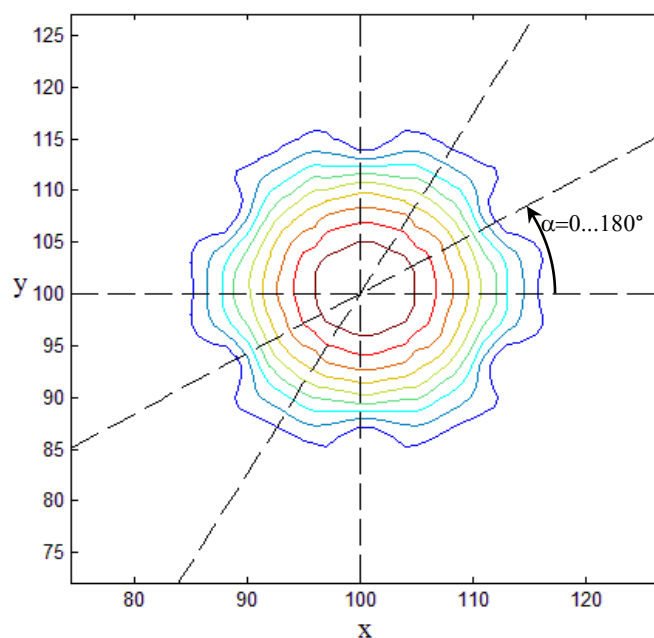


Рисунок 4.24 – Лінії (перетини), що проходять через центр модового поля ФКВ, визначений методом автозгортки

На рис. 4.25 представлено розподіл інтенсивності випромінювання в одному перетині $\alpha = 0^\circ$ ($y = 100$). За рахунок того, що в оболонці ФКВ є повітряні отвори, модове поле має деякі поглиблення, на відміну від модового поля стандартного ОВ, яке більш-менш плавно зменшується від максимального значення до нуля (рис. 4.26).

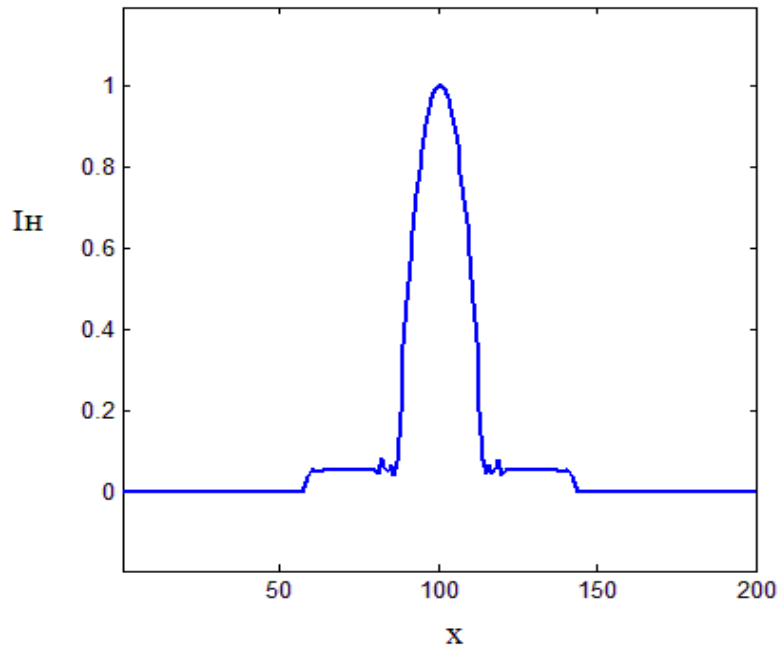


Рисунок 4.25 – Розподіл інтенсивності випромінювання ФКВ в перетині $\alpha=0^\circ$

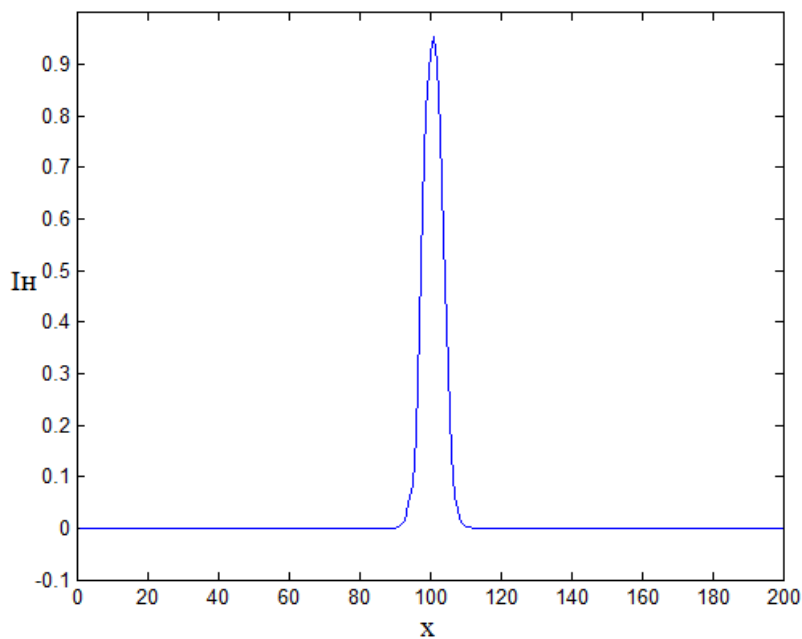


Рисунок 4.26 – Одномірний розподіл інтенсивності випромінювання одномодового оптичного волокна

Щоб підвищити точність подальших розрахунків необхідно використати фільтр Баттерворта четвертого порядку щодо одномірного розподілу інтенсивності модового поля (рис. 4.25). Зображення матиме вигляд, представлений на рис. 4.27.

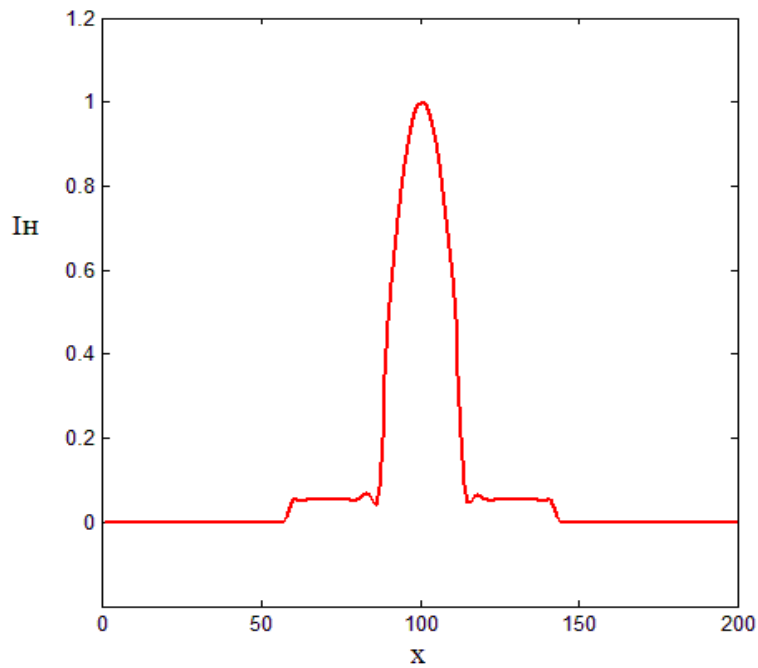


Рисунок 4.27 – Згладжений розподіл інтенсивності модового поля ФКВ після фільтрації

Для визначення діаметру модового поля спочатку пропонується знайти похідну розподілу у даному перетині [63]. Після чого визначаються координати x_1 та x_2 по обидві сторони від центру, в яких похідна дорівнюватиме нулю. Різниця між цими точками й буде визначати потрібний нам розмір модового поля (рис. 4.28).

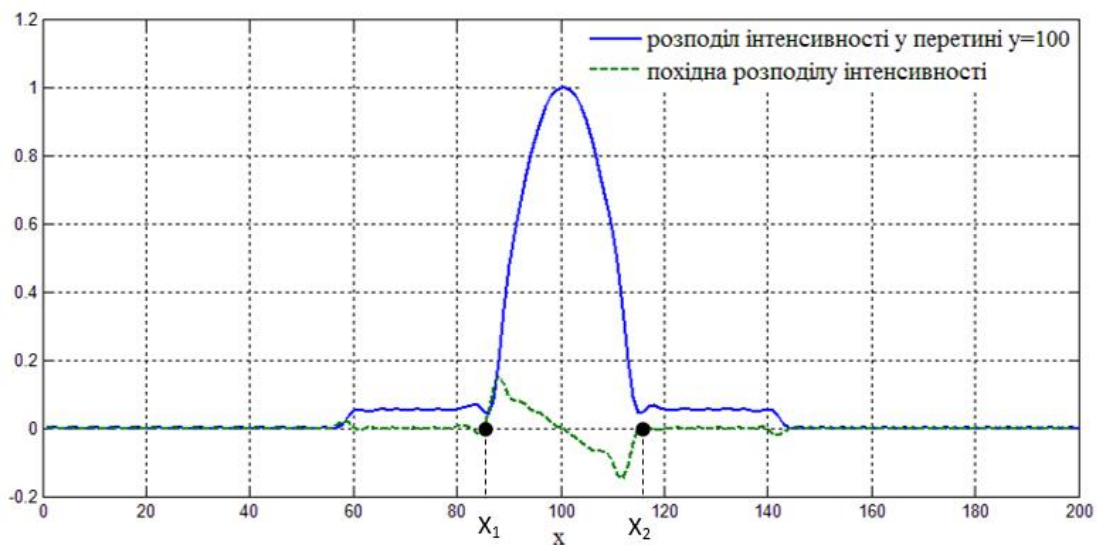


Рисунок 4.28 – Розподіл інтенсивності модового поля в перетині ФКВ (суцільна лінія) та його похідна (пунктирна лінія)

Аналогічні операції потрібно провести для кожного перетину з кроком у один градус. Завершальною процедурою є визначення перетину, в якому модове поле матиме максимальний діаметр.

Таким чином, за допомогою пропонованого методу визначення положення перетину з максимальним розміром модового поля, можна контролювати позиціонування двох фотонно-кристалічних волокон під час виконання з'єднання. Це дозволить зменшити втрати на стику. Треба відмітити, що даний метод можна застосовувати тільки для ФКВ з парною кількістю отворів у першому колі. Тобто повинна виконуватися умова симетрії розподілу інтенсивності модового поля відносно центру у будь-якому перетині.

4.3 Система керування позиціонуванням ФКВ за кутом повороту навколо поздовжньої осі

За результатами досліджень розроблено структурну схему системи керування позиціонуванням за кутом оберту фотонно-кристалічних волокон навколо осі (рис. 4.29) [95, 97, 99]. Дана структурна схема містить випромінювач, який освітлює волокно у поздовжньому напрямку. Передатна функція джерела випромінювання має вигляд:

$$W_{вин}(s) = W_{дж.л\delta}(s) \cdot W_{л\delta}(s) \cdot W_{фм}(s), \quad (4.36)$$

де $W_{дж.л\delta}(s)$ – передатна функція джерела живлення випромінювача;

$W_{л\delta}(s)$ – передатна функція лазерного діоду;

$W_{фм}(s)$ – передатна функція фільтра мод.

Фотоприймач і перетворювач сигналів реєструє оптичне поле, сформоване фотонно-кристалічним волокном з передатною функцією $W_{PCF}(s)$, та перетворює його у цифровий вигляд. Передатну функцію блоку формування і обробки зображення можна записати у вигляді:

$$W_{зобр}(s) = W_{oc}(s) \cdot k_n \cdot W_{ПЗС}(s) \cdot W_{АЦП}(s), \quad (4.37)$$

де $W_{oc}(s)$ – передатна функція оптичної системи;

$W_{ПЗС}(s)$ – передатна функція матриці ПЗЗ;

k_n і $W_{АЦП}(s)$ – коефіцієнт підсилення і передатна функція аналогово-цифрового перетворювача.

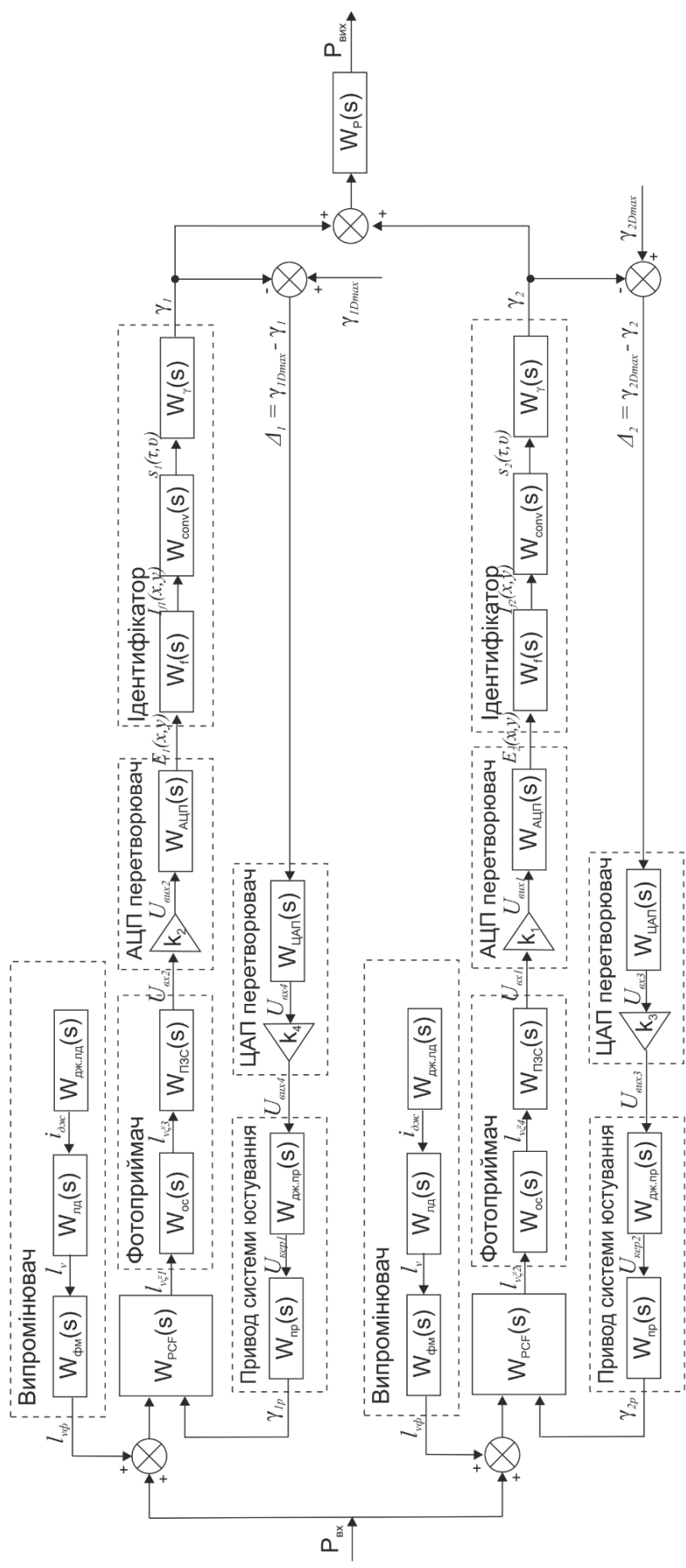


Рисунок 4.29 – Структурна схема системи керування позиціонуванням ФКВ за кутом повороту навколо поздовжньої осі

Далі сформований сигнал у вигляді масиву інтенсивностей випромінювання, потрапляє до ідентифікатора, який реалізує метод визначення координат центру модового поля кожного волокна та положення максимального діаметру і подає керуючий сигнал на приводи системи юстування для здійснення повороту ФКВ на потрібний кут.

Еквівалентна передатна функція цифроаналогового перетворювача та приводу системи юстування має вигляд:

$$W_{юст}(s) = W_{ЦАП}(s) \cdot k_m \cdot W_{джер.пр}(s) \cdot W_{пр}(s), \quad (4.38)$$

де k_m і $W_{ЦАП}(s)$ – коефіцієнт підсилення і передатна функція цифроаналогового перетворювача;

$W_{джер.пр}(s)$ – передатна функція джерела живлення приводу системи юстування;

$W_{пр}(s)$ – передатна функція приводу системи юстування.

На виході системи керування відбувається розрахунок геометричних розузгоджень між ФКВ за розмірами і формою модового поля і визначаються очікувані втрати оптичної потужності.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПРОЦЕСІ З'ЄДНАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН

5.1 Дослідження застосування методу автозгортки для процесу позиціонування в нероз'ємних з'єднаннях ФКВ

Запропонований метод контролю позиціонування ФКВ був експериментально досліджений на дослідних зразках технологічного обладнання [50, 51]. Дослідження виконувалися за методикою, аналогічною моделюванню на комп'ютері. Чутливість і точність методу у ході експериментальних досліджень перевірялися за допомогою еталонних зсувів зображень на задану величину ρ , які контролювалися атестованим вимірювачем малих переміщень.

Дослідження були проведені на автоматизованій установці зварювання оптичних волокон фірми Fujikura (рис. 5.1). В якості пристроїв переміщення використовувалися штатні мікрометричні переміщувачі в режимі ручного керування. Переміщення V-образних фіксаторів оптичних волокон контролювалися індуктивним вимірювачем малих переміщень «Мікрон-02».

Волокно опромінюється світловим колімованим пучком під прямим кутом щодо осі оптичного волокна. Зондуєчий промінь проходить крізь волокно. Потім випромінювання крізь оптичну систему потрапляє до матриці ПЗЗ, викликаючи накоплення в кожній її комірці електричного заряду, пропорційного освітленості цієї комірки. Електричний заряд періодично послідовно зчитується з усіх комірок матриці та, після аналого-цифрового перетворення, формується у відеосигнал, який виводиться на монітор комп'ютера (ПК).

Методика проведення досліджень полягає у формуванні зсуву зображення ФКВ у площині багатоелементного ПЗЗ фотоприймача, реєстрації інтенсивності оптичного поля випромінювання, перетворення його в цифрову форму й обробку.

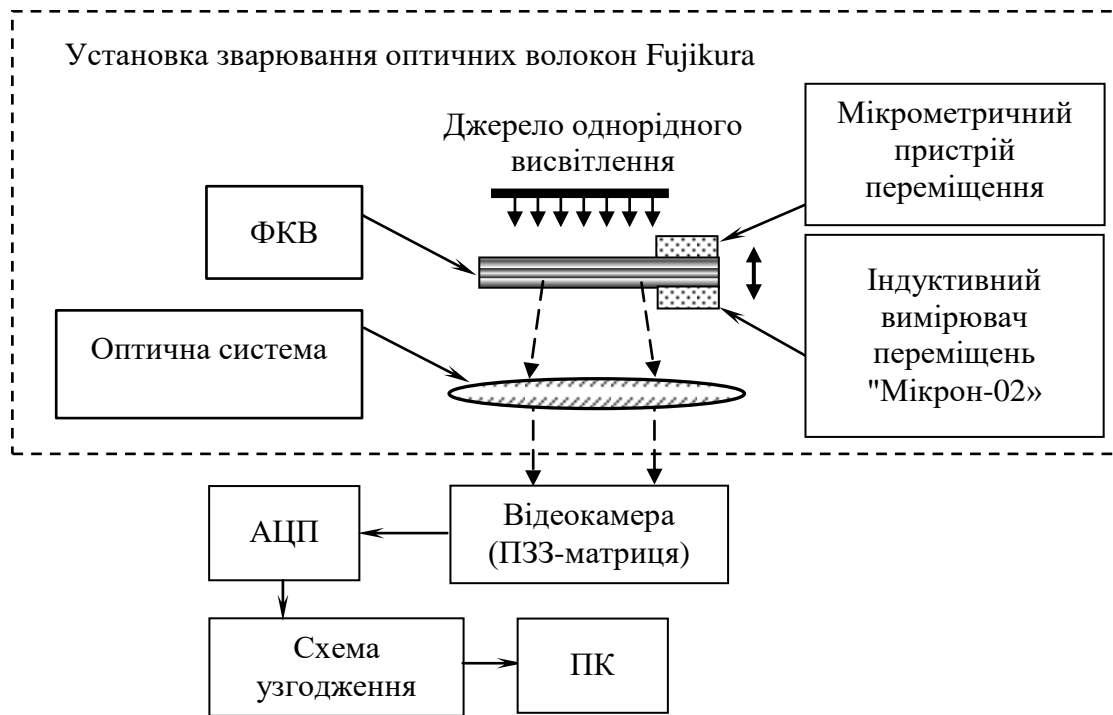


Рисунок 5.1 – Схема експериментальної установки на базі пристрою зварювання оптичних волокон фірми Fujikura для дослідження методу автозгортки при поперечному зондуванні ФКВ

На рис. 5.2 (а, б) зображено вимірні розподіли оптичного поля ФКВ при поперечному щодо осі зондуванні за різними фокусами лінзи.

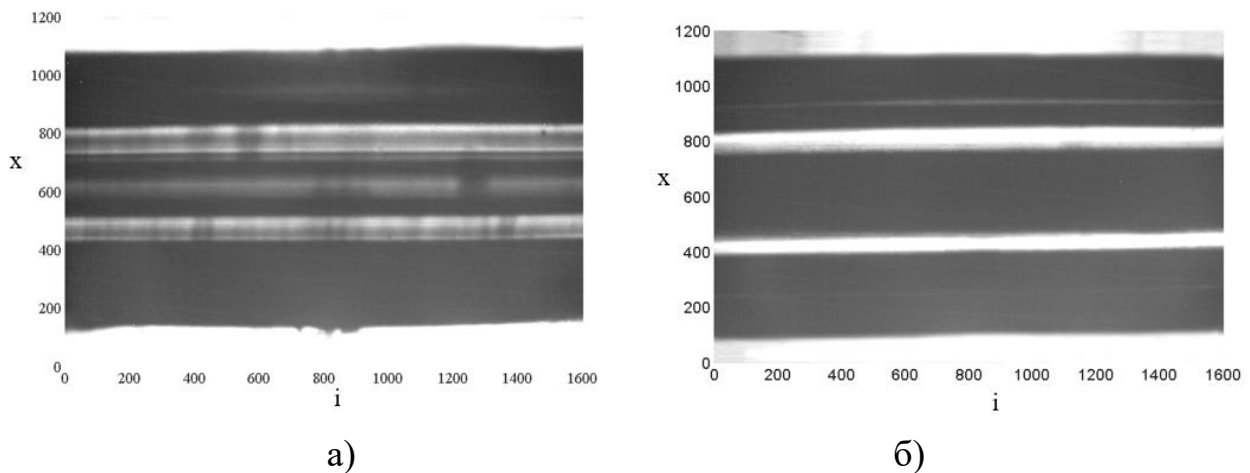


Рисунок 5.2 – Інтенсивність оптичного поля при поперечному висвітленні ФКВ та різних фокусах лінзи оптичної системи

Симетричність розподілу оптичного поля сформованого ФКВ залежить від різних факторів: кут повороту ФКВ відносно своєї осі, нерівномірність освітлення, дефекти форми та поверхонь, наявність забруднень на ФКВ та оптичних елементах системи вимірювання, нерівномірність чутливості матриці ПЗЗ тощо.

Однак навіть за наявністю значних похибок вимірювання інтенсивності поля існує чітко виражений і однозначно обумовлений максимум автозгортки вимірюваного розподілу, що дозволяє з високою точністю і перешкодозахищеністю визначати похибки позиціонування.

Для перевірки точності пропонованого методу були проведені розрахунки координат центру розподілу інтенсивності вимірюваного поля інтегральним методом через центр мас функції за формулою (2.1).

Для проведення досліджень були розроблені алгоритм і програма. Схема алгоритму представлена на рис. 5.3.

Можна виділити наступні основні етапи проведеного дослідження [50]:

- отримання зображення поля ФКВ;
- формування одновимірного сигналу розподілу поля $I(x)$;
- зміщення сигналу на визначену величину;
- фільтрування та видалення фонові складової сигналу;
- обчислення автозгортки сигналу та визначення координати її максимального значення;
- визначення координати осі методом автозгортки;
- визначення координати осі інтегральним методом через центр мас;
- порівняння отриманих результатів.

Під час визначення меж фону та оболонки ФКВ виникають незначні труднощі, засновані на необхідності експериментального визначення деяких параметрів p_1 та p_2 .

Фонова складова має високу інтенсивність порівняно з сигналом, що формується самим волокном. Тому на межі фону та ФКВ інтенсивність випромінювання має різкий стрибок, а на графіку похідної в цих місцях з'являються сплески (див. рис. 5.4).

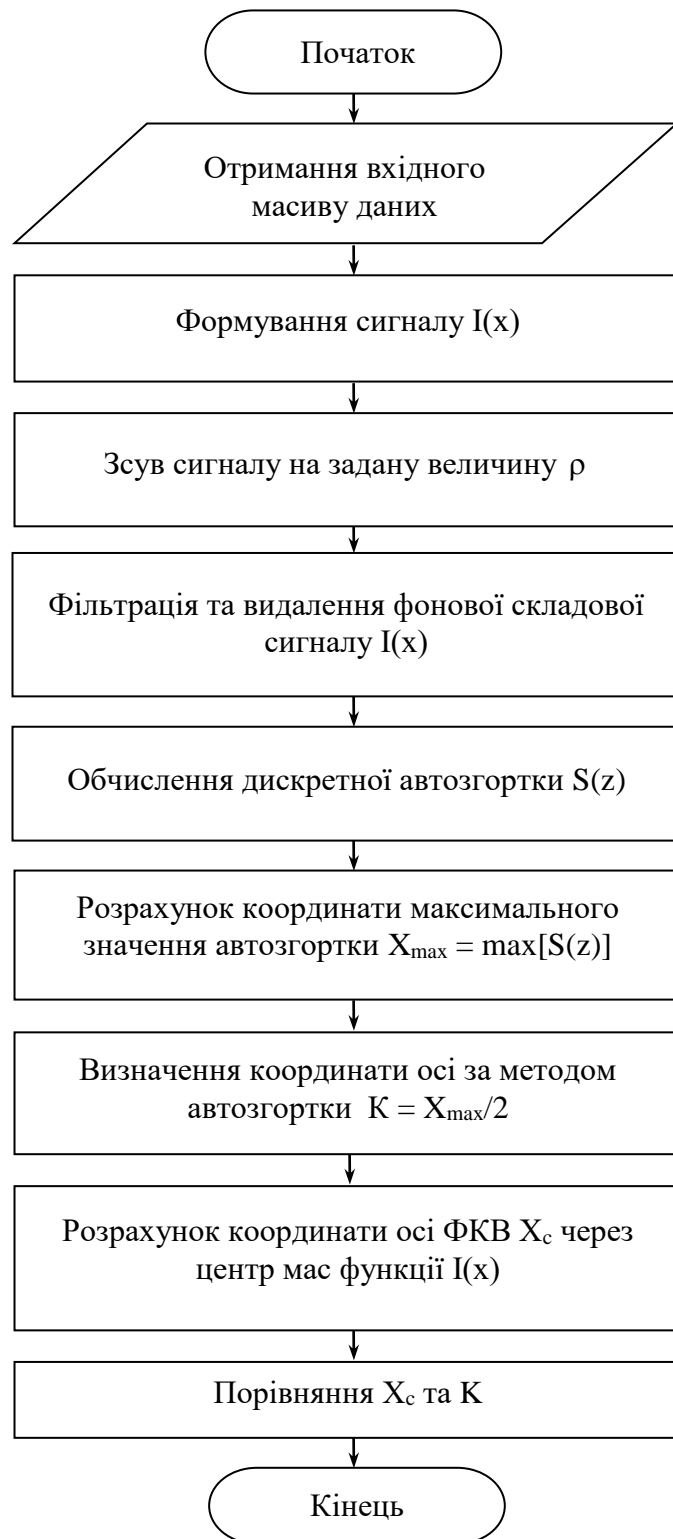


Рисунок 5.3 – Схема алгоритму досліджень точності методу автозгортки

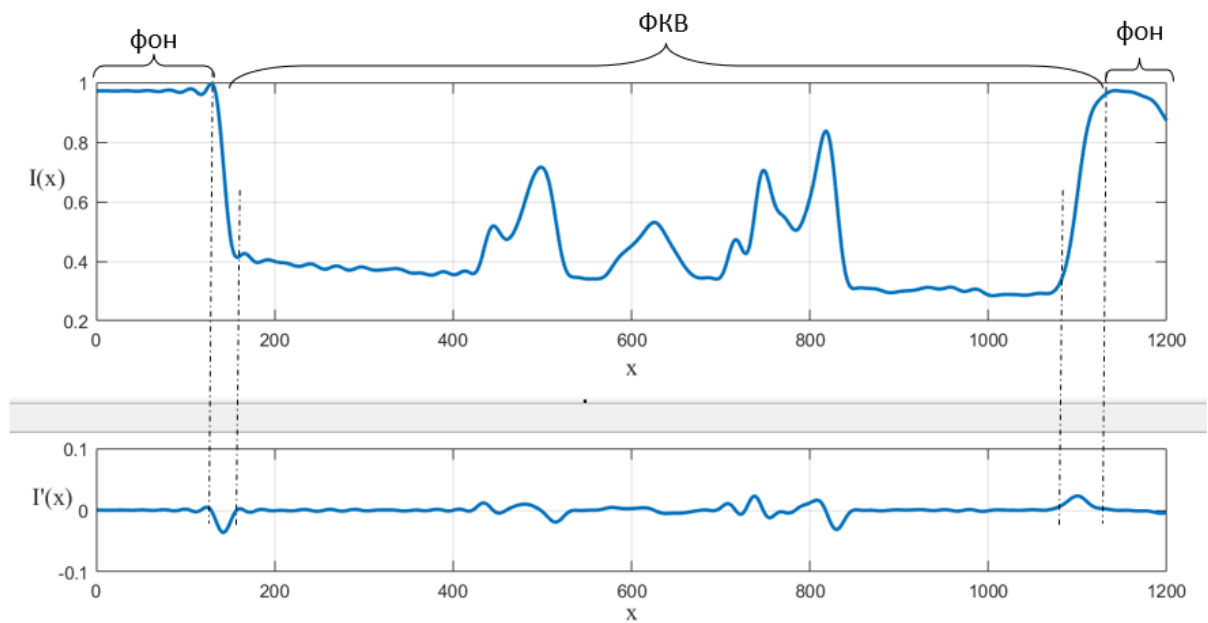


Рисунок 5.4 – Розподіл інтенсивності оптичного поля в одному перетині ФКВ і розрахована похідна

На графіку похідної сигналу (рис. 5.5) наведено параметри p_1 та p_2 , які обираються таким чином, щоб мінімізувати небажані спотворення розрахунків. На рис. 5.6 та 5.7 наведені результати, отримані при різних параметрах для зображень ФКВ на рис. 5.2, а та 5.2, б відповідно.

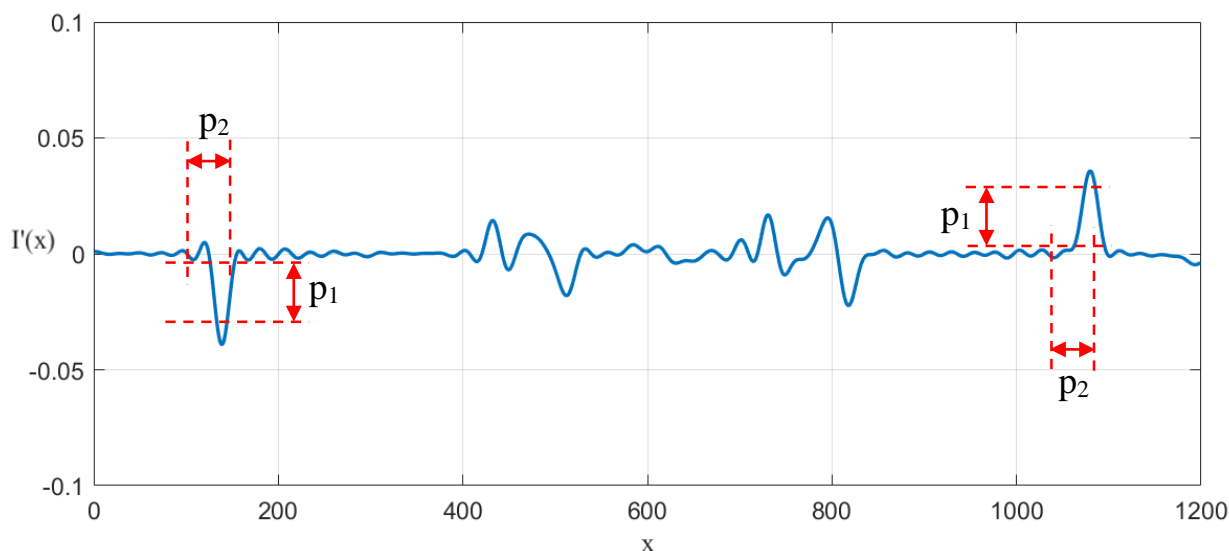


Рисунок 5.5 – Похідна розподілу інтенсивності поля ФКВ

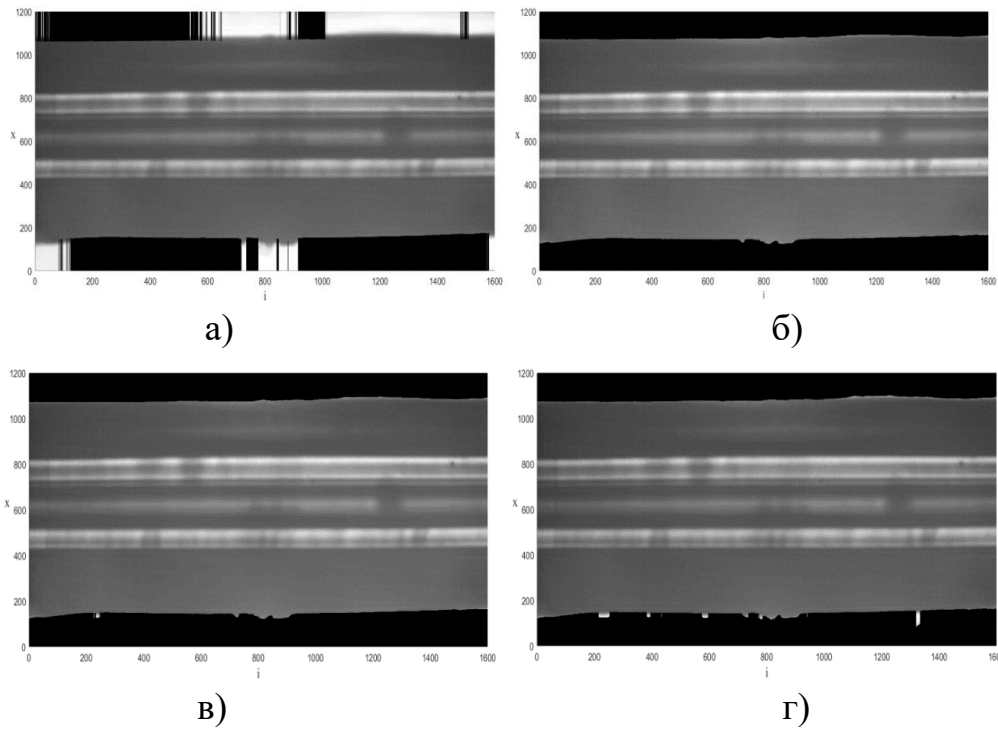


Рисунок 5.6 – Підбір параметрів p_1 ($p_2 = 20$) для визначення меж фону та оболонки ФКВ, зображеного на рис. 5.2, а:
 $p_1 = 0,03$ (а); $p_1 = 0,01$ (б); $p_1 = 0,08$ (в); $p_1 = 0,005$ (г)

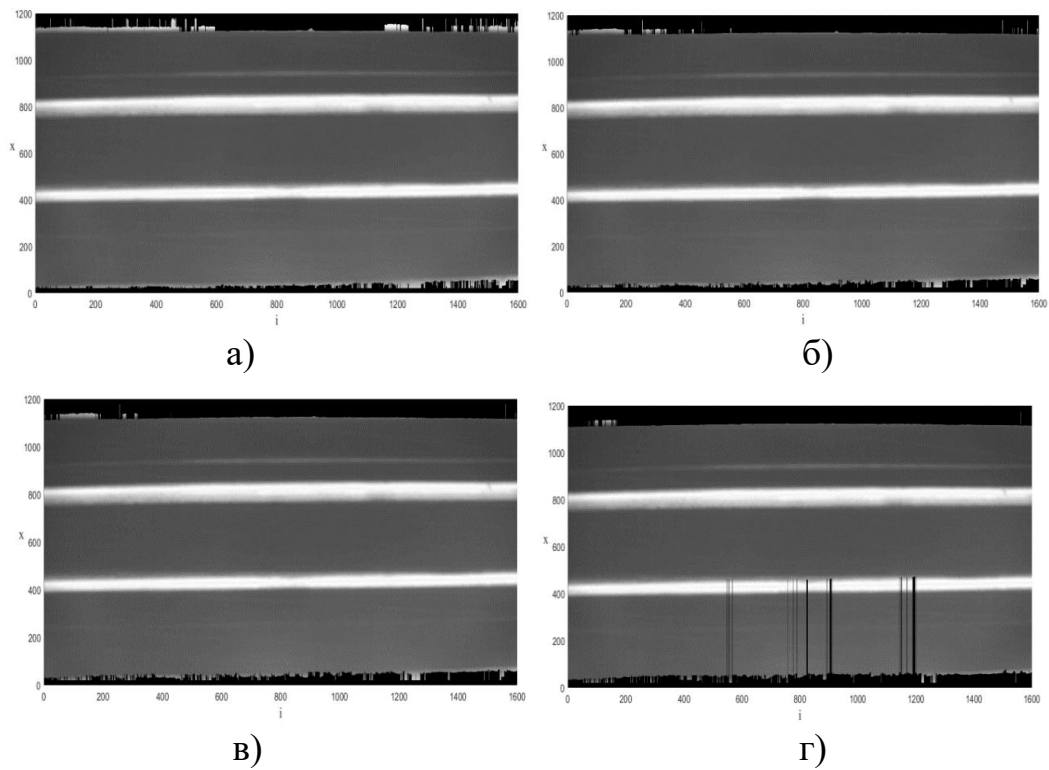
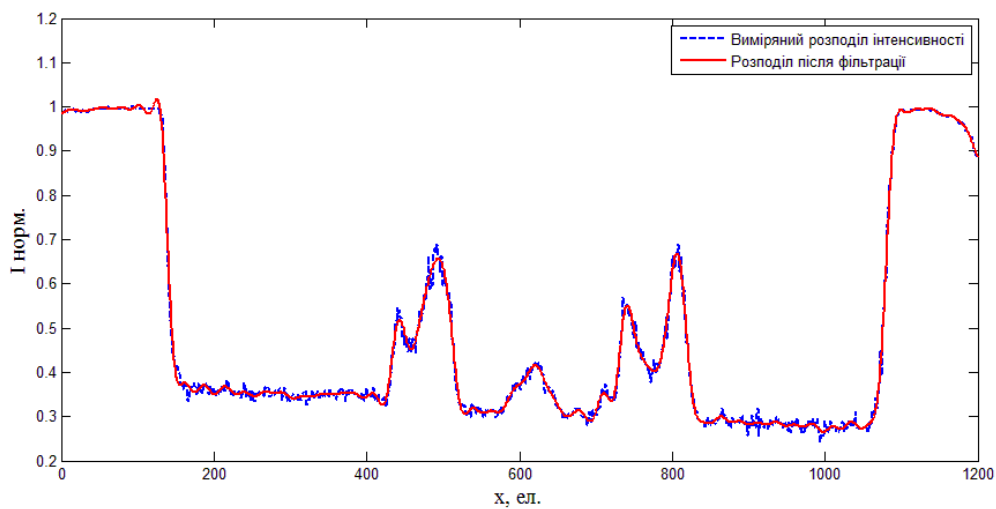


Рисунок 5.7 – Підбір параметрів p_1 ($p_2 = 50$) для визначення меж фону та оболонки ФКВ, зображеного на рис. 5.2, б:
 $p_1 = 0,003$ (а); $p_1 = 0,005$ (б); $p_1 = 0,006$ (в); $p_1 = 0,008$ (г)

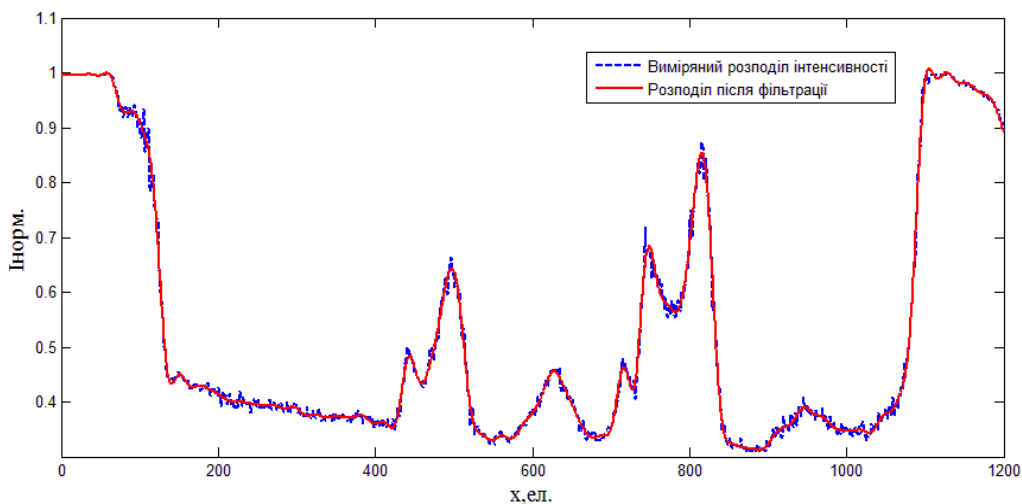
Як можна бачити, найкращі результати отримано за $p_1 = 0,01$ та $p_2 = 20$ для зображення ФКВ, поданого на рис. 5.2, *а*, та $p_1 = 0,006$, $p_2 = 50$ для зображення ФКВ, поданого на рис. 5.2, *б*.

Виміряні та відфільтровані одновимірні розподіли інтенсивності поля ФКВ, зображеного на рис. 5.2, *а* у двох поперечних перетинах $i=200$ та $i=800$ представлені на рис. 5.8, *а* та 5.8, *б* відповідно.

На рис. 5.9 (*а*, *б*) представлені результати виключення фону з розподілів інтенсивності випромінювання, наведених на рис. 5.8 (*а*, *б*) та розрахована автозгортка.



а)



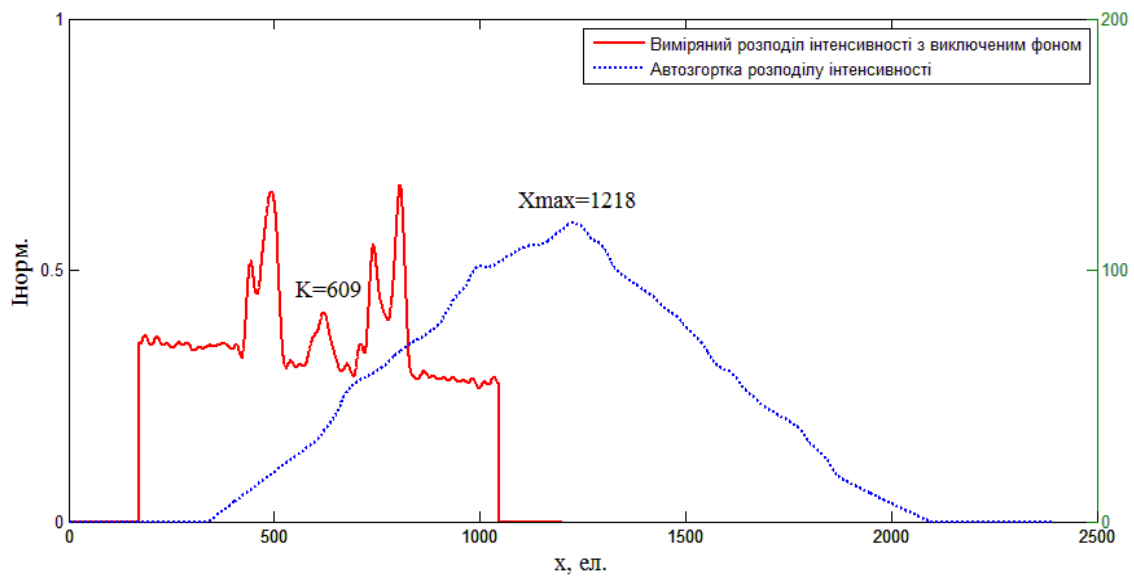
б)

Рисунок 5.8 – Розподіл оптичного поля та його відфільтроване значення у двох перетинах оптичного поля ФКВ, представленого на рис. 5.2, *а*:

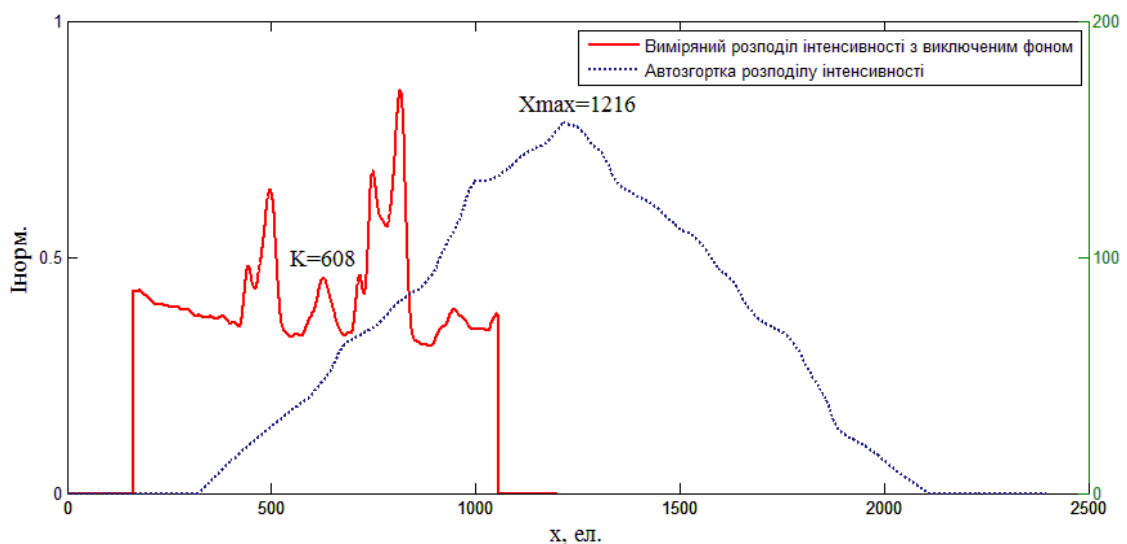
$i = 200$ (*а*), $i = 800$ (*б*)

В перетині $i = 200$ отримано координату максимуму автозгортки $X_{\max} = 1218$, значить координата центру розподілу $K = 609$. Для цього ж розподілу розрахована координата центру інтегральним методом $X_c = 595$.

Для другого перетину $i = 800$, координата максимуму автозгортки $X_{\max} = 1216$, таким чином $K = 608$. Використання інтегрального методу дає координату центру розподілу $X_c = 601$.



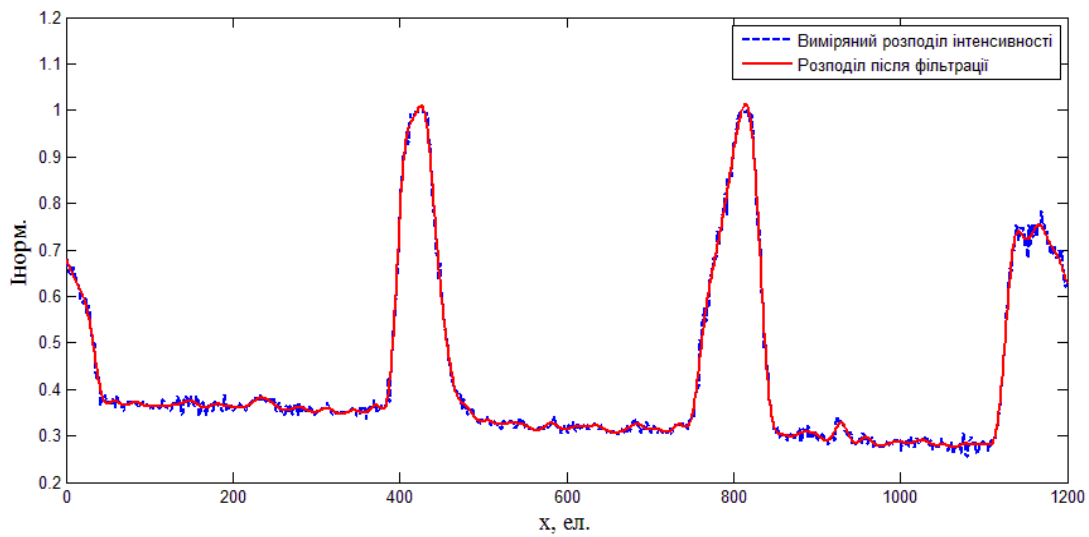
а)



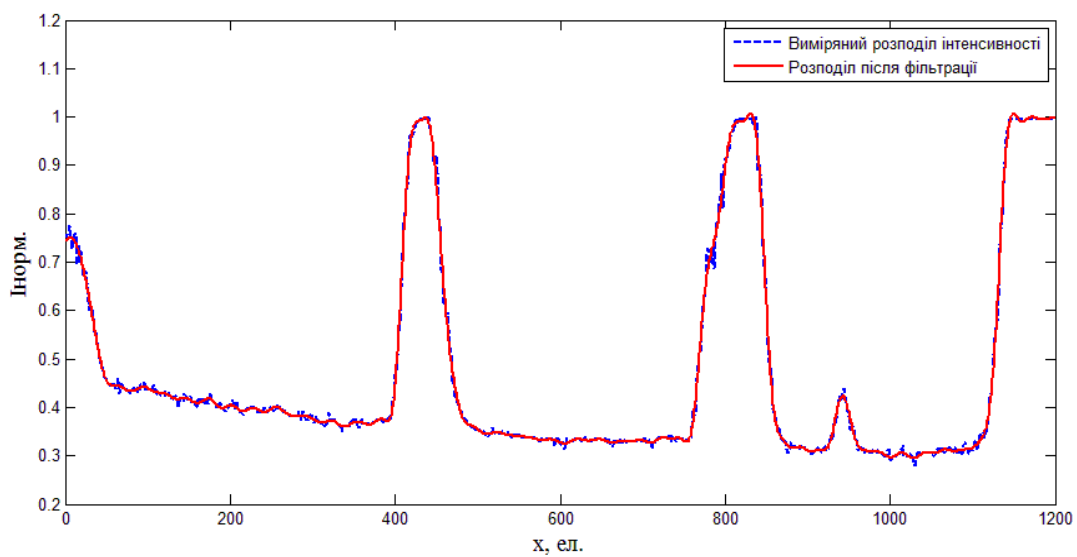
б)

Рисунок 5.9 – Вимірний розподіл інтенсивності поля з виключеним фоном та його автозгортка для оптичного поля, зображеного на (рис. 5.2, а): в перетині $i = 200$ (а); в перетині $i = 800$ (б)

На рис. 5.10, а і 5.10, б наведено вимірні та відфільтровані розподіли інтенсивності поля ФКВ при іншому фокусі лінзи, зображеному на рис. 5.2, б, також для двох поперечних перетинів $i = 200$ та $i = 800$ відповідно.



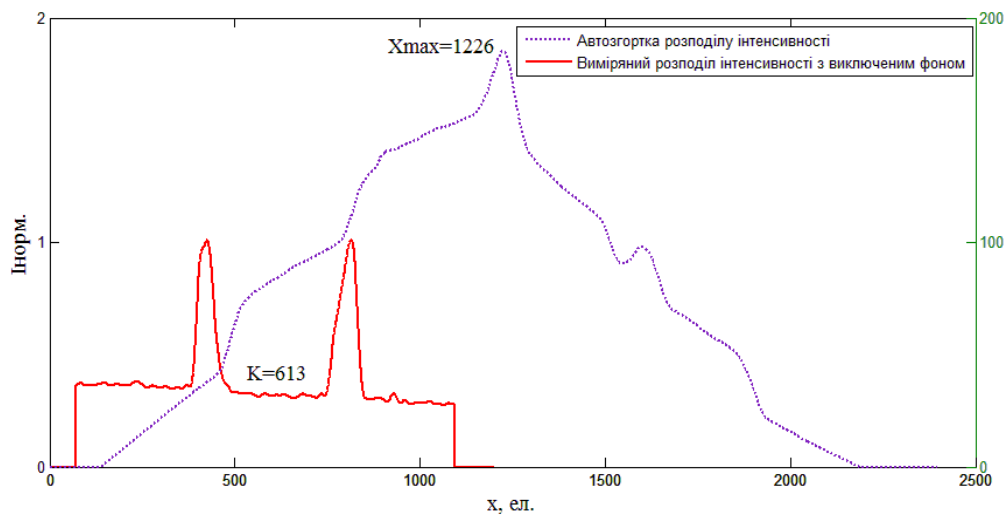
а)



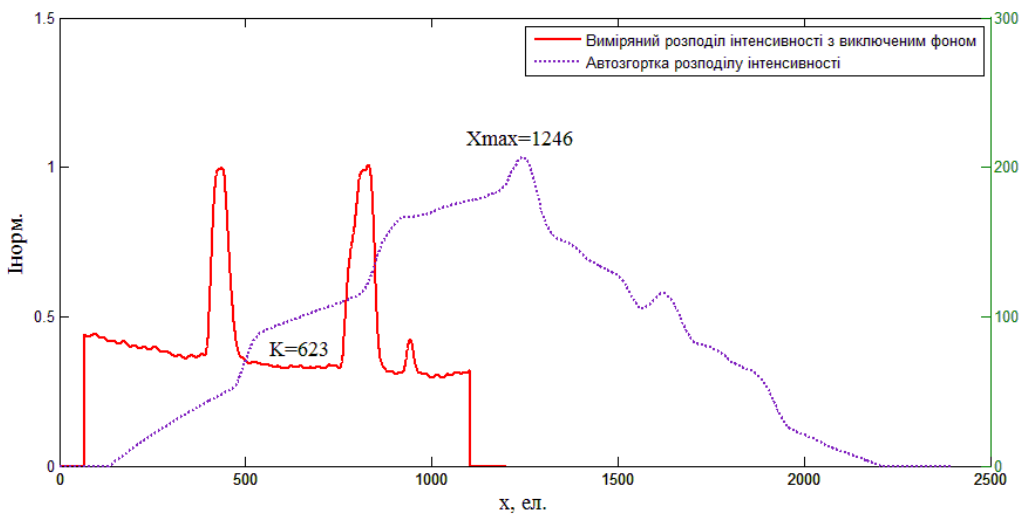
б)

Рисунок 5.10 – Розподіли оптичного поля ФКВ при іншому фокусі лінзи (рис. 5.2, б) та їх відфільтровані значення для двох перетинів: $i = 200$ (а) та $i = 800$ (б)

На рис. 5.11 (а, б) представлені результати виключення фону з розподілів інтенсивності випромінювання, наведених на рис. 5.10 (а, б) і розрахована автозгортка.



а)



б)

Рисунок 5.11 – Вимірний розподіл інтенсивності поля з виключеним фоном і його автозгортка для оптичного поля ФКВ, зображеного на (рис. 5.2, б): в перетині $i = 200$ (а); в перетині $i = 800$ (б)

Для перетину $i = 200$, координата максимуму автозгортки $X_{\max} = 1226$, а зачить координата центру розподілу $K = 613$. Інтегральний метод дає $X_c = 570$. Для перетину $i=800$, $X_{\max} = 1246$, відповідно $K = 623$. Координата центру розподілу, що визначено інтегральним методом дорівнює $X_c = 575$.

Таким чином, визначивши координати центрів розподілів в кожному перетині зображення ФКВ, отримаємо вектор координат, які визначають вісь серцевини волокна. На рис. 5.12 подано центральні координати в перетинах ФКВ, зображеного на рис. 5.2, а, визначених методом автозгортки.

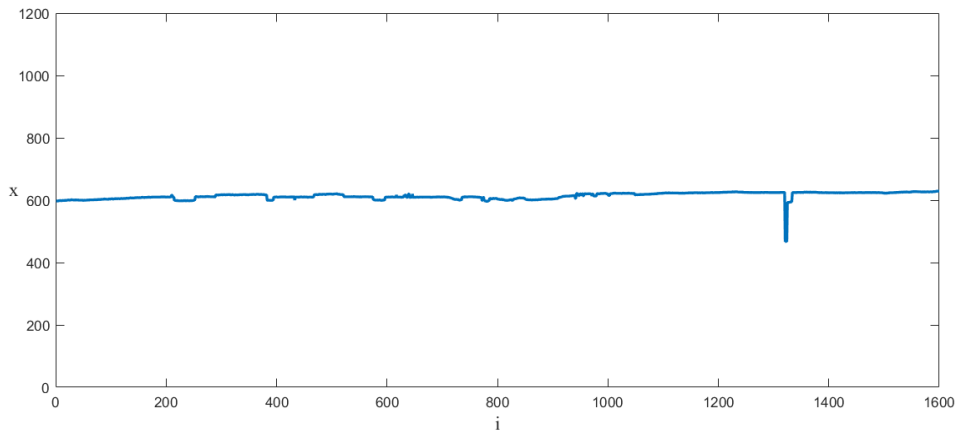


Рисунок 5.12 – Розраховані методом автозгортки координати центрів
одновимірних розподілів поперечного перетину зображення ФКВ,
поданого на рис. 5.2, *a*

Вісь ФКВ побудуємо лінією регресії отриманого розподілу. Для вирішення цієї задачі використано метод найменших квадратів.

Зв'язок між показником $x(i)$ і фактором x з урахуванням можливих відхилень має вигляд

$$x(i) = ai + \beta + l,$$

де a і β – невідомі параметри регресії;

l – випадкова змінна, що характеризує відхилення паралельно осі ординат спостережуваних точок від лінії регресії.

Таким чином, показник $x(i)$ зображується у вигляді систематичної складової $ax + \beta$ і випадкової величини l .

Оцінкою даної моделі буде рівняння парної регресії вигляду:

$$x(i) = ai + b$$

Оцінки параметрів a і b лінії регресії $x(i) = ai + b$ мають бути підібрані методом найменших квадратів таким чином, щоб сума квадратів відхилень $Q(a, b)$ була мінімальною, тобто

$$Q(a, b) = \sum_{k=1}^n l_k^2 \Rightarrow \min.$$

На рис. 5.13 наведено вікно вводу вихідних даних для побудови лінії тренду та результати розрахунків для ФКВ, зображеного на рис. 5.2, *a*. Розраховані методом автозгортки координати осі ФКВ та побудована лінія регресії подані на рис. 5.14 [90, 91, 100]. Рівняння регресії має вигляд:

$$F(x) = 0,014 x + 603,2$$

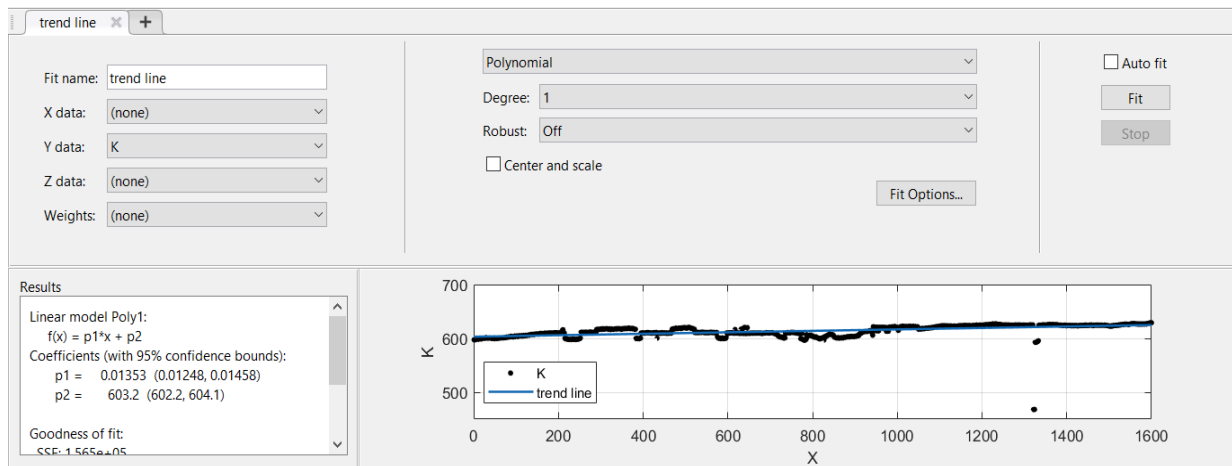


Рисунок 5.13 – Побудова лінії регресії для осі ФКВ, зображеного на рис. 5.2, *a*

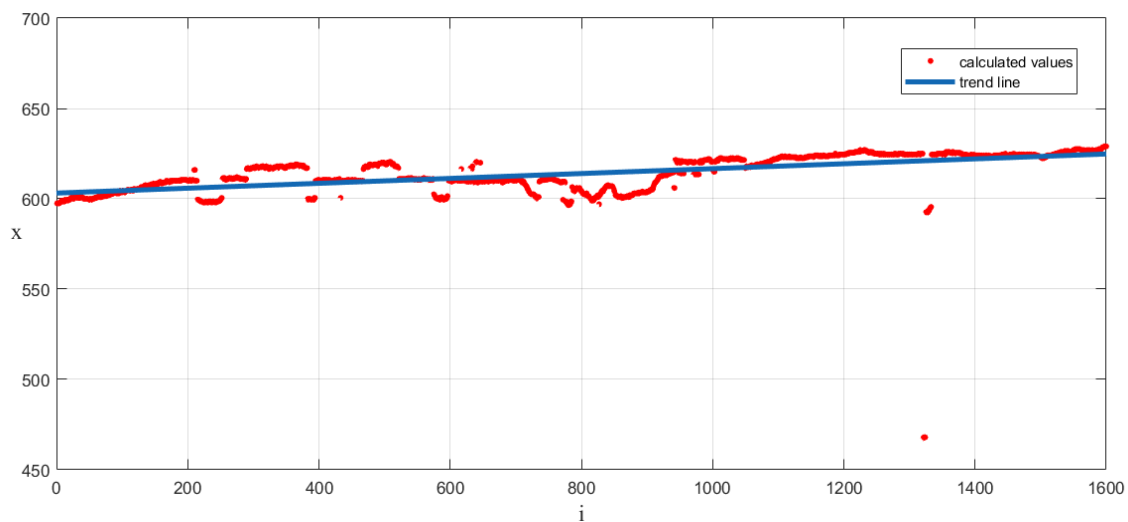


Рисунок 5.14 – Розрахований центр серцевини ФКВ, зображеного на рис. 5.2, *a* (переривчаста лінія) та лінія тренду (суцільна лінія)

За рахунок деяких викидів розрахованих значень координат осі серцевини ФКВ, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,79$.

На рис. 5.15 подано результат розрахунку центру серцевини ФКВ, зображеного на рис. 5.2, б методом автозгортки.

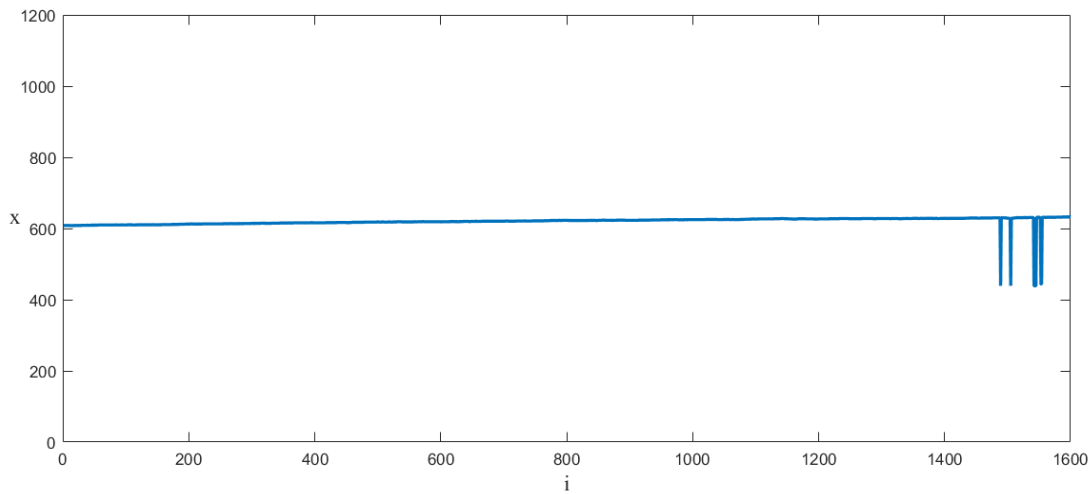


Рисунок 5.15 – Розрахований методом автозгортки центр серцевини ФКВ, зображеного на рис. 5.2, б

На рис. 5.16 наведено вікно вводу вихідних даних для побудови лінії тренду та результати розрахунків для ФКВ, зображеного на рис. 5.2, б. Розраховані методом автозгортки координати осі ФКВ та побудована лінія регресії подані на рис. 5.17. Рівняння регресії в даному випадку має вигляд:

$$F(x) = 0,01 x + 611,8,$$

а коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,72$.

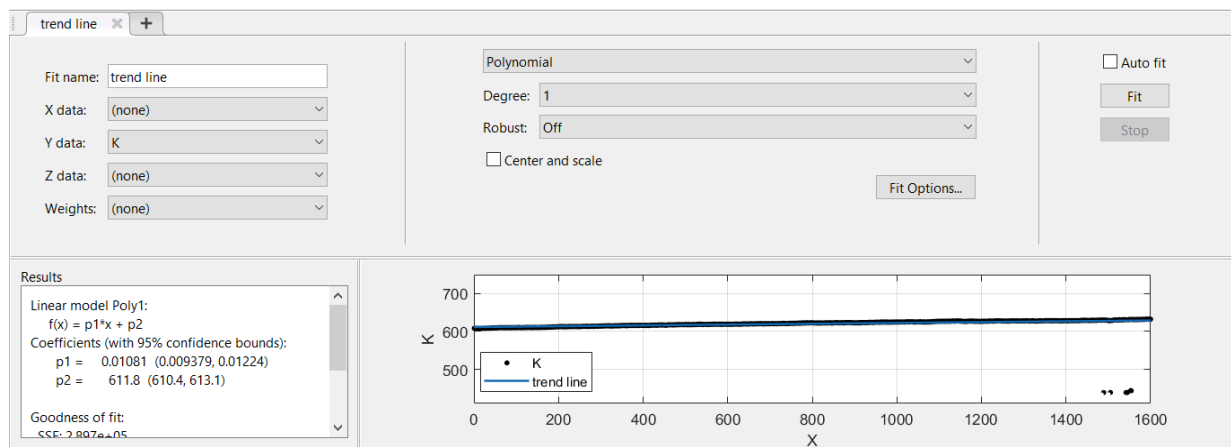


Рисунок 5.16 – Побудова лінії регресії для осі ФКВ, зображеного на рис. 5.2, б

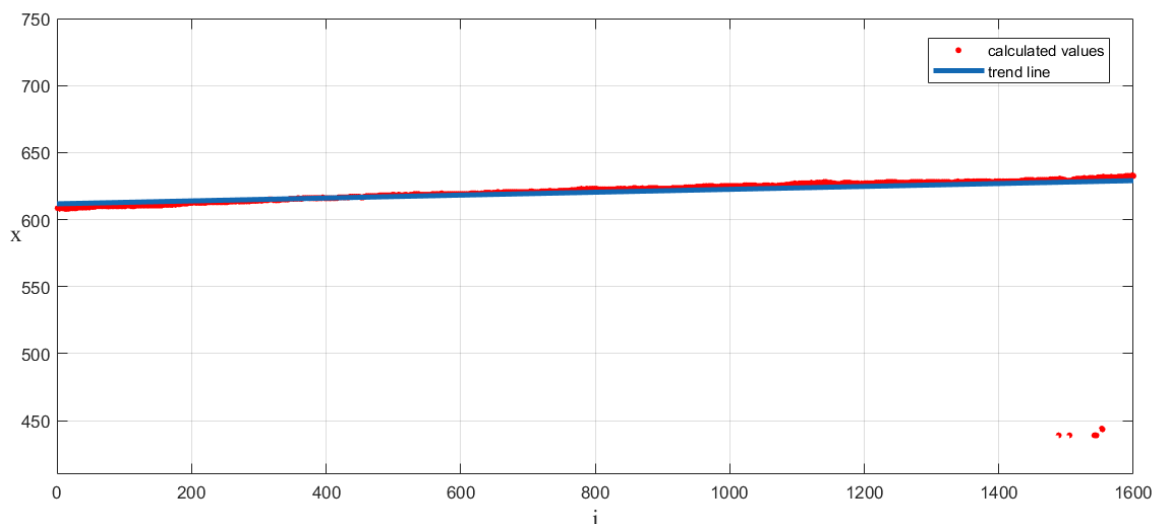


Рисунок 5.17 – Розрахований центр серцевини ФКВ, зображеного на рис. 5.2, б (переривчаста лінія) та лінія тренду (суцільна лінія)

На рис. 5.18 і рис. 5.19 подані результати розрахунку осі ФКВ, зображеного на рис. 5.2, а і рис. 5.2, б методом автозгортки (суцільна лінія) та інтегральним методом (переривчаста лінія).

Для порівняння точності методу автозгортки і інтегрального методу, в експерименті виконано декілька вимірювань для кожного зображення ФКВ. Волокно із початкового положення зміщувалося перпендикулярно осі абсцис на 4,8, 9,2 та 12,0 мкм. Зміщення контролювалися атестованим вимірювачем «Мікрон-02». Зсув координати центру серцевини волокна відносно початкового положення обчислювався методом автозгортки та інтегральним методом для кожного кроку у трьох перерізах. Відомо, що роздільна здатність цієї вимірювальної системи становить 5 елементів на мікромметр, що дозволило розрахувати похибки вимірювання обох методів.

Результати експериментальних досліджень для двох зображень вимірюного поля ФКВ при різних фокусах лінзи занесені до табл. 5.1 і табл. 5.2.

Дослідження показали високу точність визначення координат осі серцевини ФКВ запропонованим методом автозгортки у 97,8%. Використання поширеного інтегрального методу забезпечує точність переміщення лише 91,7%. Як зазначалося вище, ФКВ мають щодо осі симетричну будову. Однак через дію різних факторів, сформовані ними оптичні поля можуть характеризуватися істотною несиметричністю розподілу. До даних факторів відносяться

нерівномірність джерел випромінювання, дефекти форми і поверхонь, наявність забруднень на об'єктах контролю й оптичних елементів, нерівномірність чутливості і переносу заряду ПЗЗ фотоприймачів.

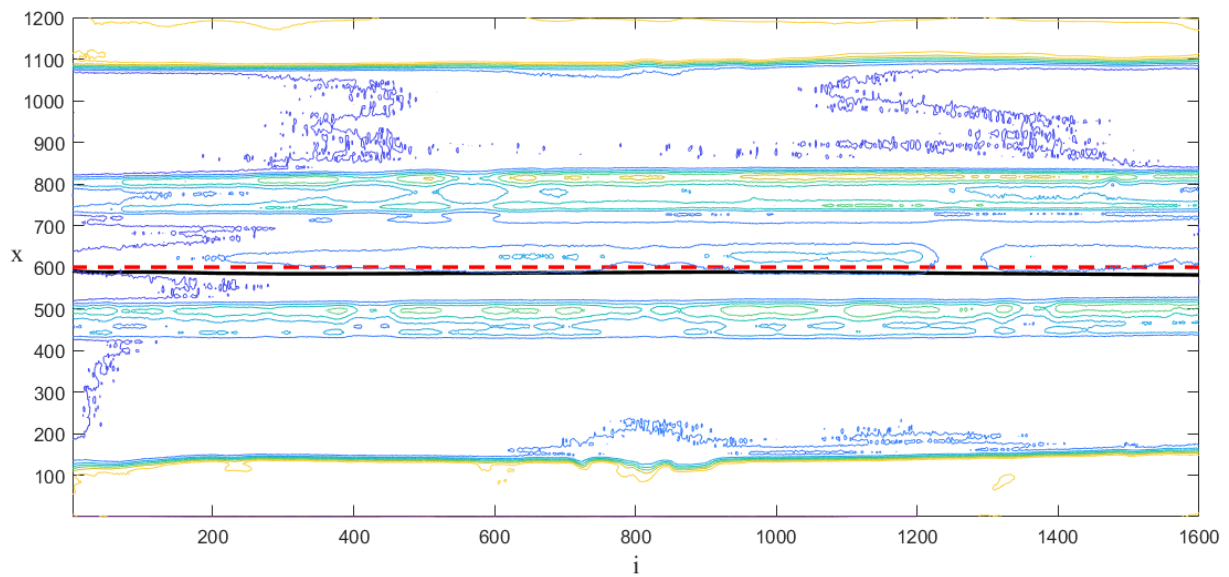


Рисунок 5.18 – Розрахована методом автозгортки (суцільна лінія) та інтегральним методом (переривчаста лінія) вісь ФКВ, зображеного на рис. 5.2, а

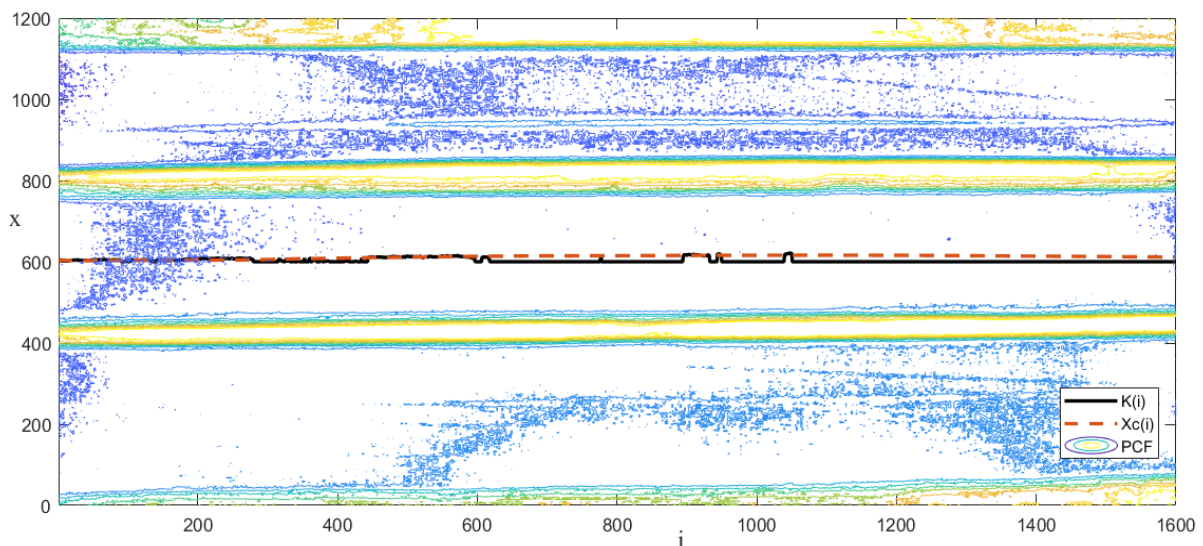


Рисунок 5.19 – Розрахована методом автозгортки (суцільна лінія) та інтегральним методом (переривчаста лінія) вісь ФКВ, зображеного на рис. 5.2, б

Таблиця 5.1 – Порівняння точності методу автозгортки та інтегрального методу в визначенні центру розподілу поля, зображеного на рис. 5.2, а

| Номер вимірювання | Задане зміщення зображення, мкм | Перетин | Зміщення осі, розраховане методом автозгортки, елем. | Зміщення осі, розраховане інтегральним методом, елем. | Похибка методу автозгортки, % | Похибка інтегрального методу, % |
|-------------------|---------------------------------|---------|--|---|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4,8 | i=100 | 24,5 | 26 | 2,1 | 8,3 |
| 2 | | i=200 | 24,5 | 25,5 | 2,1 | 6,2 |
| 3 | | i=300 | 23,5 | 25,5 | 2,1 | 6,2 |
| 4 | 9,2 | i=400 | 47 | 48,5 | 2,2 | 5,4 |
| 5 | | i=500 | 46,5 | 48 | 1,0 | 4,3 |
| 6 | | i=600 | 46,5 | 49 | 1,0 | 6,5 |
| 7 | 12,0 | i=700 | 60,5 | 65 | 1,0 | 8,3 |
| 8 | | i=800 | 61 | 64,5 | 2,0 | 7,5 |
| 9 | | i=900 | 60,5 | 64 | 1,0 | 6,7 |

Таблиця 5.2 – Порівняння точності методу автозгортки та інтегрального методу в визначенні центру розподілу поля, зображеного на рис. 5.2, б

| Номер вимірювання | Задане зміщення зображення, мкм | Перетин | Зміщення осі, розраховане методом автозгортки, елем. | Зміщення осі, розраховане інтегральним методом, елем. | Похибка методу автозгортки, % | Похибка інтегрального методу, % |
|-------------------|---------------------------------|---------|--|---|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4,8 | i=100 | 23,5 | 25,5 | 2,1 | 6,2 |
| 2 | | i=200 | 24,5 | 25 | 2,1 | 4,1 |
| 3 | | i=300 | 24,5 | 25,5 | 2,1 | 6,2 |

Продовження таблиці 5.2

| | | | | | | |
|---|------|-------|------|------|-----|-----|
| 4 | 9,2 | i=400 | 46,5 | 47,5 | 2,2 | 3,2 |
| 5 | | i=500 | 47,5 | 47 | 1,0 | 2,1 |
| 6 | | i=600 | 46,5 | 48 | 1,0 | 4,3 |
| 7 | 12,0 | i=700 | 61,5 | 63 | 1,0 | 5,0 |
| 8 | | i=800 | 60,5 | 63,5 | 2,0 | 5,9 |
| 9 | | i=900 | 59,5 | 63 | 1,0 | 5,0 |

Проведені дослідження показали, що, незважаючи на зазначені впливи, запропонований метод має високу перешкодозахищеність і більш високу точність в порівнянні з інтегральним методом.

5.2 Дослідження процесу позиціонування ФКВ за максимальним діаметром модового поля

Для вимірювання діаметру модового поля існує декілька методів [78, 92, 93]. Один з них – метод ближнього поля – дозволяє виміряти не тільки діаметр модового поля, але й визначити геометричні параметри волокна. Метод заснований на вимірянні діаметра модового поля на вихідному торці волокна за допомогою сфокусованої оптики, що передає розподіл потужності випромінювання по торцю волокна на площадку матричного фотоприймача. Найбільш точні результати вимірювань з невеликими похибками можна отримати якщо використовуються детектори з великим динамічним діапазоном, та ретельно підготовлені торці волокон.

Типова установка для реалізації методу ближнього поля містить оптичну систему, багатоелементний ПЗЗ-фотоприймач, АЦП і керуючий персональний комп'ютер (рис. 5.20).

Шаг розташування фоточуттєвих елементів матриці ПЗЗ визначає роздільну здатність вимірювальної системи. При цьому повинна використовуватися високоапертурна лінзова система, яка збільшує торець волокна, зображення якого сканується телекамерою на основі багатоелементного фотоприймача з зарядовим зв'язком. Для виконання точних вимірювань необхідні прецизійне калібрування і сполучення оптики. В даному

методі важлива роль належить числовій апертурі оптичної системи: низькоапертурна оптика може робити неприйнятні відсічення в просторово-частотній області, викликаючи великі помилки у визначенні профілю показника заломлення. З цієї причини, повинна використовуватися оптика з $NA > 0,5$. Динамічний діапазон систем контролю на основі методу ближнього поля повинний бути більше $40...45$ дБ [62].

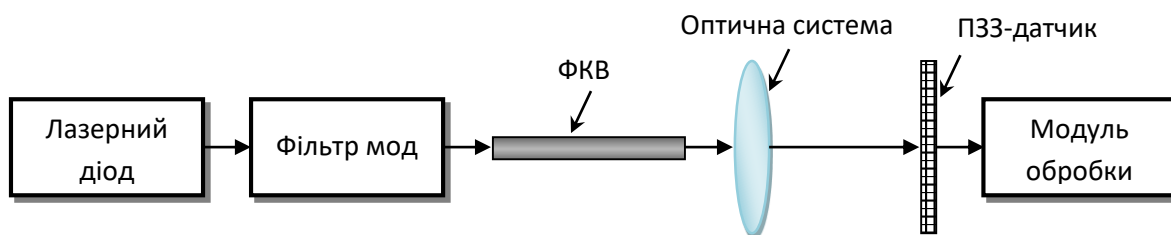


Рисунок 5.20 – Схема вимірювання ФКВ методом ближнього поля

Описані особливості обумовлюють схильність методу ближнього поля імпульсному і високочастотному шуму при вимірюванні інтенсивності оптичного поля за рахунок нерівномірності чутливості і шумів ПЗЗ, похибки аналого-цифрового перетворення, наявності забруднень на торці й елементах оптичної системи. Пропонований метод є ефективним в мінімізації впливу описаних джерел шуму, які виникають під час вимірювання оптичного випромінювання, на точність позиціонування.

Отримане зображення модового поля у поперечному перетині ФКВ показано на рис. 5.21. Вимірне зображення фільтрується від впливу шумів та підлягає подальшій обробці. На рис. 5.22-5.26 подано одновимірні розподіли модового поля в різних перетинах, що проходять через центр ФКВ, визначений методом автозгортки.

Діаметр модового поля в перетині розраховано через похідну одновимірного розподілу. Результат визначення діаметрів модового поля у кожному перетині з кроком в один градус представлений на рис. 5.27.

Для більш точного та однозначного визначення положення максимального діаметра модового поля необхідно згладити отриманий графік залежності. Для цього пропонується використати фільтр Баттерворта [54, 101]. На рис. 5.28 наведено результат проведення даної операції.

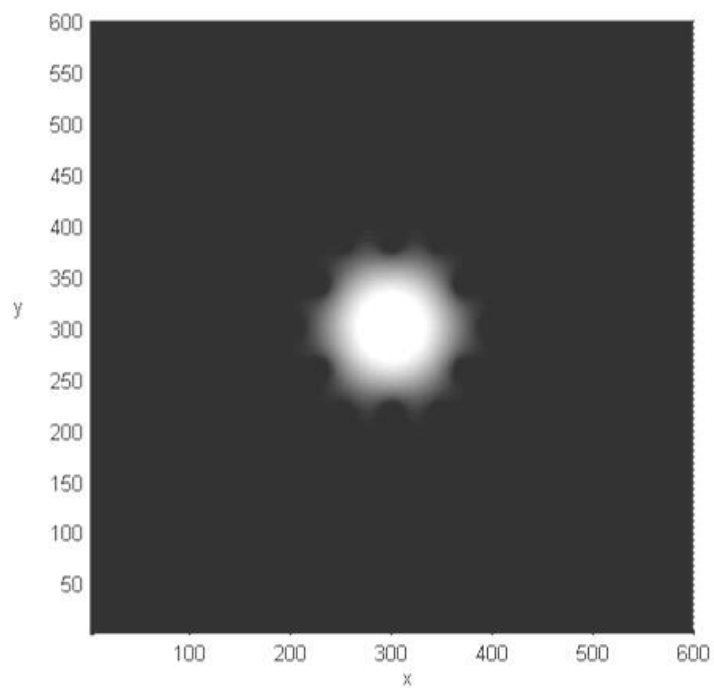


Рисунок 5.21 – Вимірне зображення модового поля ФКВ в поперечному перетині

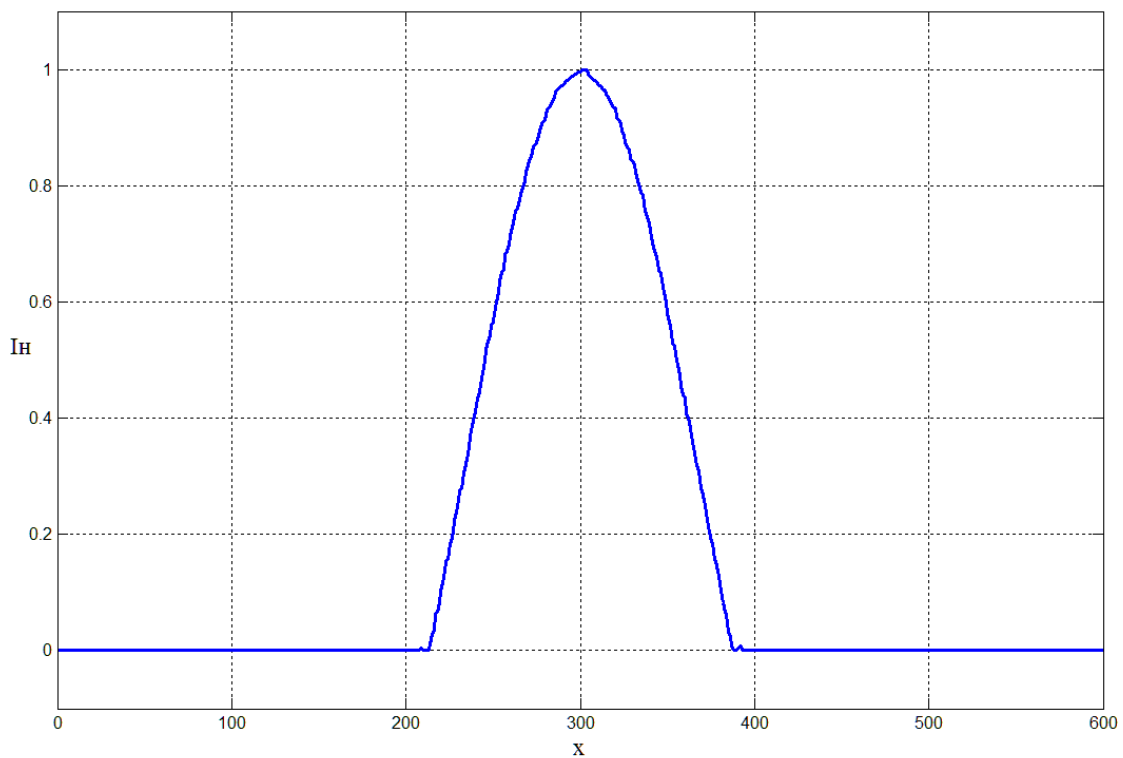


Рисунок 5.22 – Нормований розподіл інтенсивності модового поля в перетині $\alpha=0^\circ$ (діаметр модового поля $w_0 = 183$)

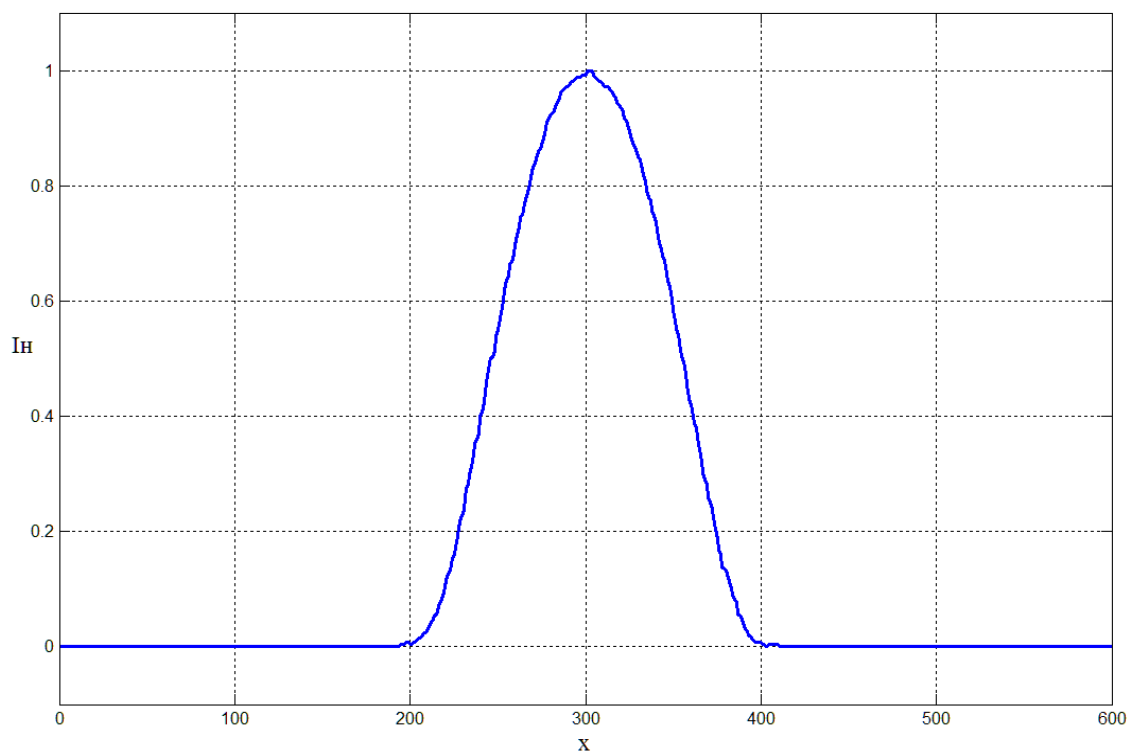


Рисунок 5.23 – Нормований розподіл інтенсивності модового поля в перетині $\alpha=10^\circ$ (діаметр модового поля $w_{10} = 215$)

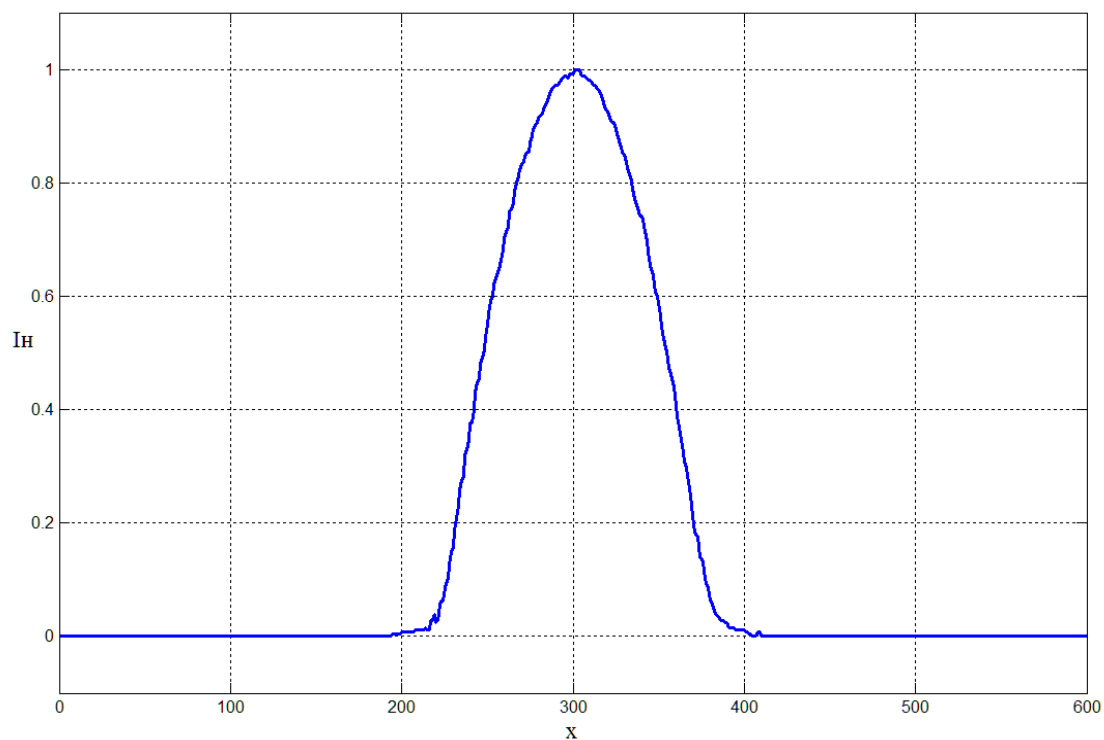


Рисунок 5.24 – Нормований розподіл інтенсивності модового поля в перетині $\alpha=20^\circ$ (діаметр модового поля $w_{20} = 214$)

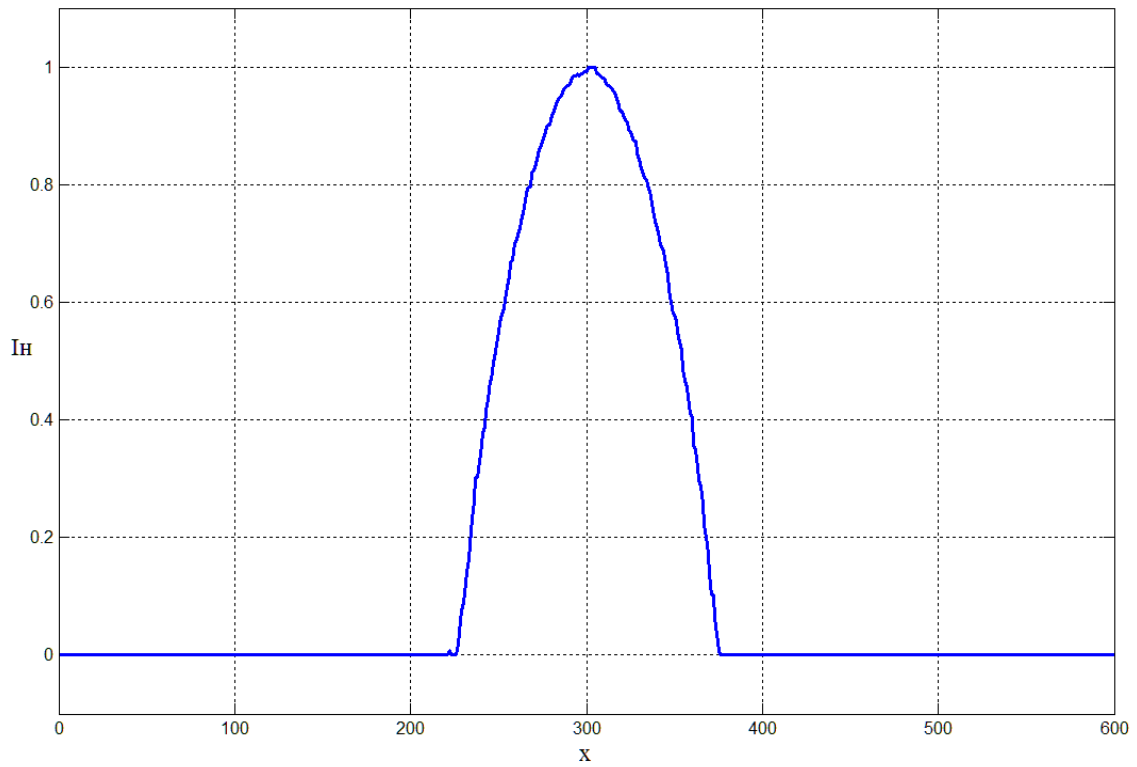


Рисунок 5.25 – Нормований розподіл інтенсивності модового поля в перетині $\alpha=30^\circ$ (діаметр модового поля $w_{30} = 153$)

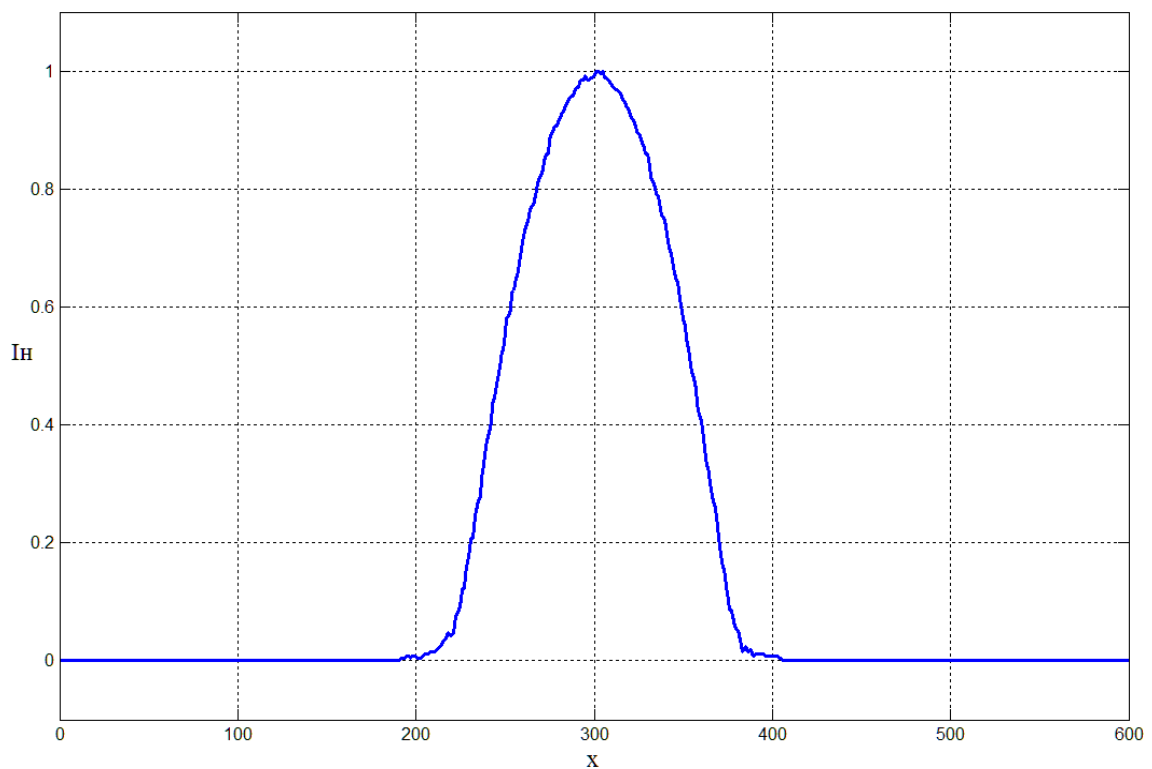


Рисунок 5.26 – Нормований розподіл інтенсивності модового поля в перетині $\alpha=40^\circ$ (діаметр модового поля $w_{40} = 213$)

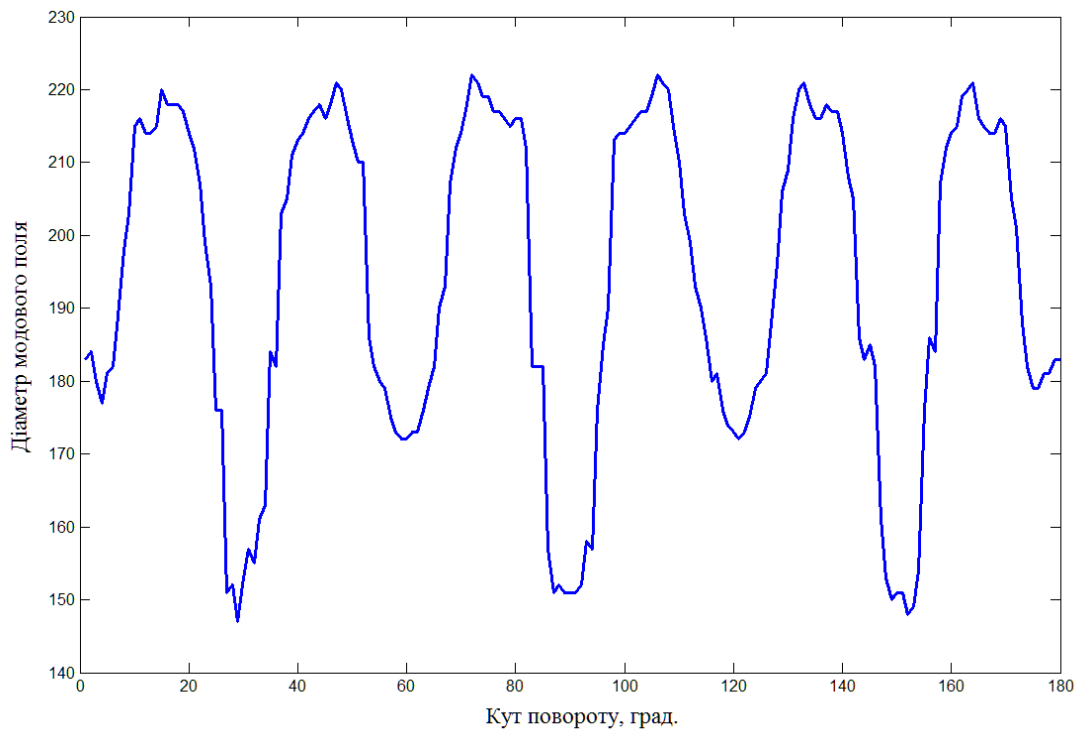


Рисунок 5.27 – Залежність діаметра модового поля від кута повороту перетину в діапазоні від 0 до 180°

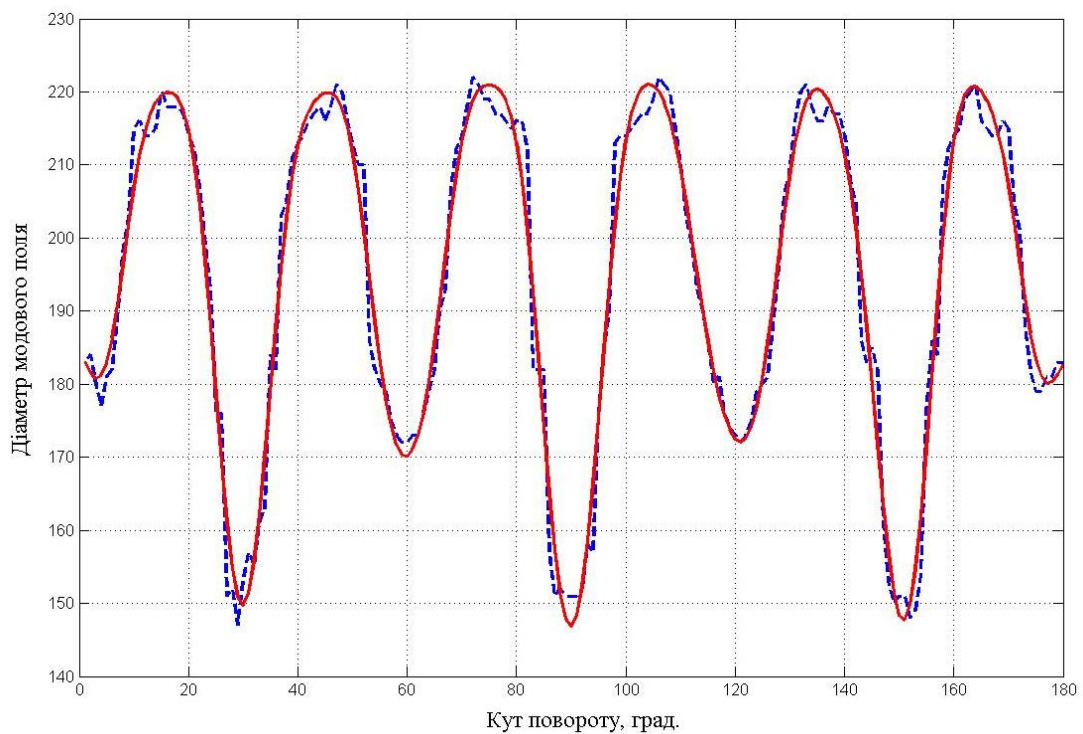


Рисунок 5.28 – Залежність діаметра модового поля від кута повороту перетину в діапазоні від 0 до 180° (розраховані значення – пунктирна лінія, згладжена фільтром Баттерворта – суцільна)

В результаті отримано значення діаметрів модового поля в кожному перетині з кроком в 1 градус [61, 69]. В табл. 5.3 наведено результати з кроком у 10°. Далі не складно визначити положення максимального значення діаметру – це 75° і 105°. Невелика різниця між отриманими значеннями максимальних діаметрів (222 і 223 од.) дозволяє проводити позиціонування ФКВ на будь-якому з них.

Таблиця 5.3 – Залежність діаметра модового поля від кута повороту

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Кут нахилу перетину, град. | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| Діаметр модового поля в перетині, од. | 183 | 216 | 212 | 157 | 214 | 210 | 173 | 218 | 216 | 151 | 215 | 203 | 172 | 216 | 208 | 151 |

Різниця діаметрів модових полів ідентичних волокон може досягти 14 мкм, що призведе до втрат сигналу за цим параметром у 0,62 дБ. Знаючи положення максимального діаметру модового поля для кожного ФКВ, що з'єднуються, можна зменшити втрати оптичного сигналу за рахунок збільшення перекриття модових полів.

ВИСНОВКИ

В монографії розглядається важливе та актуальне науково-прикладне завдання з розробки методів та засобів технологічного, інформаційного та математичного забезпечення, які гарантують задані параметри процесів позиціонування фотонно-кристалічних волокон та відповідно низькі оптичні втрати у їх з'єднаннях.

Проведені дослідження технологічних процесів з'єднань фотонно-кристалічних волокон і впливу структури ФКВ на процеси позиціонування і з'єднання дозволили виділити фактори втрат у ФКВ та їх з'єднаннях.

В монографії велику увагу приділено розробці структури автоматизованого модуля контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон та системи керування позиціонуванням за лінійними координатами та за кутом повороту.

За рахунок обґрунтування методів поперечного та поздовжнього оптичного контролю об'єкту, врахування особливостей оптико-геометричної структури ФКВ удосконалено математичне забезпечення автоматизованої системи керування процесом з'єднання фотонно-кристалічних волокон, що сприяло покращенню характеристик якості процесу позиціонування.

Метод позиціонування ФКВ за їх осями, заснований на аналізі розподілення оптичного поля, сформованого ФКВ при поперечному зондуванні світловим променем, і побудований на основі визначених методом автозгортки координат центру розподілу оптичного поля фотонно-кристалічних волокон та їх регресією дає змогу підвищити точність визначення розташування волокна.

В процесі комп'ютерного моделювання побудовано декілька моделей фотонно-кристалічних волокон з різними параметрами поперечного перетину, що дозволило розрахувати значення втрат оптичної потужності сигналу для поздовжнього, поперечного та кутового відхилень, які виникають під час з'єднань волокон. Розрахунки, які проводилися для декількох різних комбінацій з'єднань ФКВ між собою та зі стандартним оптичним волокном, показали, що чим більша різниця розмірів модових полів та більші неузгодження між осями ФКВ, що з'єднуються, тим більші втрати сигналу. Найбільші втрати виникають при кутовому нахилі фотонно-кристалічних волокон.

Розроблений метод автоматизованого позиціонування двох фотонно-кристалічних волокон, який враховує кут взаємного повороту волокон навколо їх поздовжньої осі, дає змогу враховувати структуру модового поля волокна в процесі з'єднання та зменшити оптичні втрати сигналу до 0,62 дБ на різниці модових полів для випадку з'єднання ідентичних волокон. Пропонований метод дозволяє автоматизувати процес контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон за розміром і формою модового поля ФКВ.

Проведені експериментальні дослідження розроблених методів позиціонування ФКВ при поперечному та поздовжньому освітленні показали високу точність визначення координат осі серцевини ФКВ запропонованим методом автозгортки порівняно з поширеним інтегральним методом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. P. S. J. Russell. "Photonic-Crystal Fibers," *Journal of Lightwave Technology*, Dec. 2006, vol. 24, no. 12, pp. 4729-4749. doi: 10.1109/JLT.2006.885258.
2. P. S. J. Russell. "The photonic crystal fibre revolution," *CLEO/Pacific Rim 2003. The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No.03TH8671)*, Taipei, Taiwan, 2003, pp. 3 Vol. 1, doi: 10.1109/CLEOPR.2003.1274487.
3. А. М. Желтиков. Оптика микроструктурированных волокон. М.: Наука, 2004, 281 с.
4. R. Hull, R.M. Osgood, Jr. J. Parisi, H. Warlimont. Photonic crystal fibers. *Published by Springer*, 2007, 247 p.
5. В. Каток, А. Ковтун, И. Руденко. Оптоволокно: неразъемные соединения. *Сети и телекоммуникации*, 2005, с. 23-27.
6. А. М. Желтиков. Дырчатые волноводы. *УФН*. 2000, Т. 170, с. 1203.
7. О. Е. Наний, Е. Г. Павлова. Фотонно кристаллические волокна. *Lightwave Russian Edition*, 2004, № 3, с. 47-53.
8. A. Bjarklev, J. Broeng, and A. S. Bjarklev. Photonic crystal fibres. *Kluwer Academic Publishers, Boston, MA*, 2003. ISBN 1-4020-7610-X.
9. F. Zolla, G. Renversez, A. Nicolet, B. Kuhlmeiy, S. Guenneau, D. Felbacq. Foundations of Photonic Crystal Fibres. *Imperial College Press, London*, 2005. ISBN 1-86094-507-4.
10. А. М. Желтиков. Нелинейная оптика микроструктурированных волокон. *УФН*, 2004, №174:1, с. 73-105.
11. Е. Г. Павлова. Механизмы потерь в фотонно-кристаллических волокнах. *Lightwave Russian Edition*, 2005, №3, с. 54-56.
12. С. Э. Питерских. Влияние технологических процессов производства на свойства оптических волокон, определяющие оптические потери в сварных соединениях. *Электросвязь*, 2003, №2, с. 27-31.
13. С. Э. Питерских. Влияние внутренних и внешних факторов на потери в сварных соединениях одномодовых ОВ. *Электросвязь*, 2003, №7, с. 30-33.
14. С. Э. Питерских, В. Н. Трещиков. Исследование качества сварных соединений оптических волокон различного происхождения. *Электросвязь*, №1, 2004, с. 49-51.

15. V. Katok, A. Kovtun, and I. Rudenko. Optical fiber: fixed joints. *Networks and telecommunication*, 2005, pp. 23-27.

16. Л. М. Андрушко, В. А. Вознесенский, В. Б. Каток. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи. Под ред. С. В. Свечникова и Л. М. Андрушко. К.: Техника, 1988, 239 с.

17. G. S. Kliros, J. Konstantantinidis, C. Thraskias. Prediction of Macrobending and splice losses for photonic crystal fibers based on the effective index method. *Wseas transactions on communications*, 2006, Vol. 5, Issue 8, pp. 1314-1321.

18. B. Bourliaguet, C. Paré, F. Émond, A. Croteau. Microstructured fiber splicing. *Optics Express*, vol. 11, no. 25, pp. 3412-3417.

19. R. Thapa, K. L. Corwin and B. R. Washburn. "Splicing hollow-core photonic bandgap fibers to step-index fibers using an arc fusion splicer," *Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, Long Beach, CA, USA, 2006*, pp. 1-2, doi: 10.1109/CLEO.2006.4628784.

20. Joo Hin Chong, M. K. Rao, Yinian Zhu and Ping Shum. "An effective splicing method on photonic crystal fiber using CO₂ laser," in *IEEE Photonics Technology Letters*, July 2003, vol. 15, no. 7, pp. 942-944, doi: 10.1109/LPT.2003.813410.

21. Joo Hin Chong, M. K. Rao. "Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber," *Optics Express*, vol. 11, no. 12, pp. 1365-1370.

22. T. P. Hansen, C. Jakobsen, H. R. Simonsen, J. Broeng, J. R. Folkenberg and M. W. Skovgaard. "Air-guiding photonic bandgap fibers," *OFC/NFOEC Technical Digest. Optical Fiber Communication Conference, 2005, Anaheim, CA, USA, 2005*, Vol. 2, pp. 3. doi: 10.1109/OFC.2005.192647.

23. J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks and P. St. J. Russell. "Photonic band gap guidance in optical fibers," *Science*, 1998, Vol. 282, Issue 5393, pp. 1476-1478.

24. J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell and D. M. Atkin. "All-silica single-mode fiber with photonic crystal cladding," *Optical Letters*, 1996, no. 21, pp. 1547-1549.

25. R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, P. J. Roberts, and D. C. Allan. "Single-mode photonic band gap guidance of light in air," *Science*, Sep. 1999, vol. 285, no. 5433, pp. 1537-1539.

26. W. Zhi , R. Guobin, L. Shuqin, J. Shuisheng. "Supercell lattice method for photonic crystal fibers," *Optics Express*, 5 May 2003, Vol.11, Issue 9, pp. 980-991.

27. R. Guobin, W. Zhi, L. Shuqin, L. Yan, J. Shuisheng. "Full-vectorial analysis of complex refractive-index photonic crystal fibers," *Optics Express*, 2004, Vol. 12, Issue 6, pp. 1126-1135.

28. В. В. Лысак, И. А. Сухоиванов. Технологии волоконно-оптических систем связи. Учебное пособие, *Харків, ХНУРЕ*, 2002, 76 с.

29. А. С. Гнатенко, В. И. Липкина, И. В. Гурьев. Исследование свойств одномерного фотонного кристалла методом разложения по плоским волнам. *Радиотехника, ХНУРЕ*, 2008, №153, С. 96-101.

30. И. В. Гурьев, И. А. Сухоиванов, А. В. Шулика, А. В. Кублик. Новый демультимплексор на основе двумерных фотонных кристаллов для полностью оптических интегральных схем высокой плотности. *Радиотехника, ХНУРЕ*, 2005, №143, С.107-112.

31. А. И. Филипенко. Метод анализа интенсивности излучения и его использование в производстве волоконно-оптических компонентов. *Радиотехника, ХТУРЭ*, 1999, №110, С.130-133.

32. А. I. Filipenko. Research of application of matching filtration for identification of optical fiber core position. *High technologies in mechanical engineering: Mag of sci. works.*, 2004, №2(9), pp. 233-242.

33. А. I. Filipenko. Use of optical field distribution autoconvolution for position identification of optical fibers cores at their connection. *Radiotekhnika: All-Ukr.Sci. Interdep. Mag.*, 2003, №132, pp. 109-114.

34. А. Filipenko, I. Nevludov. Core position identification of the optical fibers connection by an autoconvolution method. *Proceedings of SPIE: Advanced optoelectronics and lasers*, 2004, Vol. 5582, pp. 269-277.

35. А. И. Филипенко, Б. А. Малик. Система прецизионного контроля деталей компонентов волоконно-оптических систем передачи информации. *Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.- Харьков: ХТУРЭ*, 1997, №103, С.31-34.

36. Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко, А. Ф. Дащенко, А. В. Усов. Волоконно-оптические кабели: Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация. Монография, *Одесса, «Астропринт»*, 2000, 536 с.

37. Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко. Волоконно-оптические кабели и линии связи. Уч. пособие, Москва, Эко-Трендз, 2002, 282 с.
38. М. І. Горбійчук, Є. П. Пістун. Числові методи і моделювання на ЕОМ. Навч. посіб., Івано-Франківськ, Факел, 2010, 408 с.
39. Є. П. Пістун, І. Д. Стасюк. Основи автоматики та автоматизації. Навч. посіб., Львів, Нац. ун-т «Львів. політехніка», 2014, 333 с.
40. В. М. Левыкин, М. В. Евланов, М. А. Керносов. Паттерны проектирования требований к информационной системе: моделирование и применение. Монография. Харьков, ООО «Компанія СМІТ», 2014, 320 с.
41. А. П. Ладанюк, Л. О. Власенко. Розробка ефективних систем автоматизації технологічних комплексів з використанням методів сучасної теорії керування. *Інтегровані технології та енергозбереження*, 2013, № 3, С. 14-19.
42. В. В. Токарев, В. Е. Овчаренко, Е. В. Нежевенко. Расчет основных параметров оптикоэлектронного узла системы автоматизированного контроля шероховатости торцевой поверхности оптических наконечников. *Технология приборостроения*, 2005, №2, с. 42-44.
43. А. І. Filipenko, О. V. Sychova, О. V. Legka, "Research on welding action on dispersion properties of fiber-optic link components,". in *Begell House, Inc. Telecommunications and Radio Engineering*. vol. 68 (20), pp. 1821-1831, 2009. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v68.i20.40. ISSN: 0040-2508 (журнал, індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).
44. Novoselov S., Sychova O. Automated system of technological preparation of production. *Intelligent computer-integrated information technology in project and program management : Collective monograph* edited by I. Linde, I. Chumachenko. Riga : ISMA. pp.207-224, 2020. DOI: <https://doi.org/10.30837/MMP.2020.207>. ISBN 978-9984-891-15-6 (розділ колективної монографії, м. Рига, Латвія).
45. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №80308* Програмний засіб для автоматизації позиціонування складнопрофільних волокон за максимальним діаметром модового поля (APSCOS), автори: Филипенко О.І., Демська Н.П., Сичова О.В., Теслюк С.І. Дата реєстрації 16.07.2018 р.

46. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №80304* Комп'ютерна програма «Автоматизація обліку технологічних операцій», автори: Невлюдов І.Ш., Новоселов С.П., Сичова О.В., Донсков О.М. Дата реєстрації 16.07.2018 р.

47. Филипенко О.І., Сичова О.В. Застосування автоконволюційного методу аналізу зображень фотонно-кристалічних волокон в автоматизованій системі керування процесом їх з'єднання. *Технологія приборостроєння*. 2014. № 3. С. 17-21 (Наукове фахове видання України).

48. Filipenko A., Donskov A., Sychova O. "Photonic crystal fibers optical-geometrical properties and their impact on transfer parameters,". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. vol. 6/9 (60), pp. 45-48, 2012. (Наукове фахове видання України, з 2015 р. індексується наукометричною базою Scopus).

49. Филипенко О.І., Сичова О.В. Моделювання впливу структури фотонно-кристалічних волокон на розподіл модового поля та втрати оптичного сигналу в їх з'єднаннях. *Радиотехніка*. Харків: ХНУРЕ. 2012. Вып. 171. С. 327-331. (Наукове фахове видання України).

50. Filipenko A., Sychova O. Monitoring of Photonic-Crystal Fibers Positioning in the Connection Process. *Radioelectronics & Informatics*. Kharkov: KhNURE. 2008. №1. С. 78-83. (Наукове фахове видання України).

51. Филипенко А.И Сычева О.В. Метод определения пространственного расположения фотонно-кристаллических волокон в процессе соединения. *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ". 2008. №1 (28). С. 56-63. (Наукове фахове видання України).

52. Филипенко А.И., Сычева О.В. Исследование зависимости передачи сигнала от разности площадей модовых полей соединяемых фотонно-кристаллических волокон. *Радиотехніка*. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харків: ХНУРЕ. 2006. Вып. 147. С. 74 -78. (Наукове фахове видання України).

53. Филипенко А.И, Сычева О.В. Автоматизированная технология контроля позиционирования оптических волокон. *Вісті Академії інженерних наук України. Спеціальний випуск. Машинобудування та прогресивні технології*. Київ: НТУУ «КПІ», 2005. №3 (26). С.113-122.

54. Филипенко А.И., Сычева О.В., Опфер С.В. Выбор цифрового фильтра для обработки излучения оптического волокна. *Радиотехніка*. Всеукр. межвед.

науч.-техн. сб. Харьков: ХНУРЕ. 2005. Вып. 143. С.113-118. (Наукове фахове видання України).

55. Морщаков Е.А., Овчаренко В.Е., Сычева О.В. Исследование метода контроля параметров формы сварного соединения оптических волокон. *Технология приборостроения*. Научн.-техн. журнал. Харьков: НИТИП. 2004. №1. С.13-16. (Наукове фахове видання України).

56. Овчаренко В.Е., Невлюдова В.В., Сычева О.В., Афанасиевский С.О. Определение параметров формы сварного соединения оптических волокон. *Технология приборостроения*. Научн.-техн. журнал. Харьков: НИТИП. 2003. №1. С.42-46. (Наукове фахове видання України).

57. 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, doi: 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9234991. (індексується наукометричними базами Scopus, Web of Science).

58. O. I. Filipenko, O. V. Sychova and O. O. Chala, "The Autoconvolution Method Use for Positioning Photonic Crystal Fibers," *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 429-432, doi: 10.1109/CAOL46282.2019.9019558. (індексується наукометричною базою Scopus).

59. O. Filipenko, O. Sychova and O. Chala, "The Investigation of Depending the Dispersion from Changes of the Optical Fibers Refractive Index Profile," *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 452-456, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632154. (індексується наукометричними базами Scopus, Web of Science).

60. O. Filipenko and O. Sychova, "Improving of photonic crystal fibers connection quality using positioning by the autoconvolution method," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 493-496, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246446. (індексується наукометричними базами Scopus, Web of Science).

61. O. Filipenko, O. Sychova and G. Ponomaryova, "Determining of the photonic-crystal fibers mode field size at his near field image," *2016 Third*

International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2016, pp. 81-83, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905342. (індексується наукометричними базами Scopus, Web of Science).

62. O. Filipenko and O. Sychova, "The identification method of the photonic-crystal fiber mode field diameter maximum position: Experimental researches," *2016 IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, Odessa, 2016, pp. 105-107, doi: 10.1109/CAOL.2016.7851393. (індексується наукометричними базами Scopus, Web of Science).

63. O. Filipenko, O. Sychova and A. Ponomaryova, "Optical losses at angle relative rotation in photonic crystal fiber connections," *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2015, pp. 104-107, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357283. (індексується наукометричними базами Scopus, Web of Science).

64. A. I. Filipenko and O. V. Sychova, "Research of misalignments and cross-sectional structure influence on optical loss in photonic crystal fibers connections," *2013 International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013)*, Sudak, Ukraine, 2013, pp. 85-87, doi: 10.1109/CAOL.2013.6657536. (індексується наукометричною базою Scopus).

65. A. I. Filipenko and O. V. Sychova, "Research of autoconvolution method efficiency under control of photonic crystal fibers positioning," *2010 10th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling*, Sevastopol, Ukraine, 2010, pp. 143-145, doi: 10.1109/LFNM.2010.5624218. (індексується наукометричною базою Scopus).

66. A. Filipenko, I. Nevludov and O. Sychova, "Optical power transmission coefficient in photonic-crystal fiber connection," *2008 International Conference on "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2008, pp. 409-411. (індексується наукометричною базою Scopus).

67. A. Filipenko and O. Sychova, "The Analysis of Creation Perspectives of Photonic Crystal Fiber Components," *2006 International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling*, Kharkiv, Ukraine, 2006, pp. 483-485, doi: 10.1109/LFNM.2006.252090. (індексується наукометричними базами Scopus, Web of Science).

68. A. Filipenko, I. Nevludov and O. Sichova, "Form parameters definition of optical fibers welded connection," *6th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, 2004. Proceedings of LFNМ 2004.*, Kharkiv, Ukraine, 2004, pp. 188-195, doi: 10.1109/LFNМ.2004.1382462. (індексується наукометричними базами Scopus, Web of Science).

69. Filipenko O., Sychova O. Increasing the quality of functional electronic elements on photonic crystal fibers. *XIV International Conference Strategy of Quality in Industry and Education*. June 4-7 2018, Varna, Bulgaria. vol. 1, pp. 125-129. (закордонна конференція, м. Варна, Болгарія).

70. Сычева О.В., Руссиян А.А. Разработка автоматизированной системы определения угловой ориентации модового поля фотонно-кристаллических волокон. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції*. Черкаси, 2016. С.60-62.

71. Филипенко О.І., Сичова О.В. Проблеми використання пристроїв на фотонно-кристалічних волокнах для забезпечення перешкодозахищеності систем передачі. *Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи (ЭМС-2015)*. Сборник научных трудов первой международной научно-технической конференции, Харьков 27 мая 2015 г. М-во образования и науки Украины, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Харьков: ХНУРЭ, 2015. С. 157-159.

72. Филипенко О.І., Сичова О.В. Позиціонування фотонно-кристалічних волокон в автоматизованій системі керування зварювальним пристроєм. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції (17-19 вересня 2014 р., м. Запоріжжя)*. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. С. 370-371.

73. Сичова О.В. Визначення втрат оптичного сигналу в з'єднаннях фотонно-кристалічних волокон в залежності від їх структури. *Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2013»: матеріали 9-ої міжнар. молодіжної наук.-техн. конф.*, Севастополь, 22-26 квітня 2013 р. М-во освіти і науки України, Севастоп. нац. техн. ун-т; наук. ред. Ю.Б. Гімпілевич. Севастополь: СевНТУ, 2013. С.187.

74. Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Потапов В. Т., Чаморовский Ю. К. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы. Спецвыпуск «Фотон-Экспресс», Наука, №6, 2005, С. 114-127.

75. Никоноров Н. В., Сидоров А. И. Материалы и технологии волоконной оптики: оптическое волокно для систем передачи информации. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009, 95 с.

76. Потапов В. Т. Состояние и перспективы рынка волоконно-оптического кабеля и оборудования. *Фотон-Экспресс*, №24, 2002, С. 3-9.

77. Borzycki K. Holey Fibers. *Application Issues. 3rd International Conference on Transparent Optical Networks*. June 18-21, 2001, Cracow, Poland, С. 92-95.

78. Лазарев Л. П., Мировицкая С. Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. М.: Радио и связь, 1988, 280 с.

79. Ghunawat A. K. et al. Design Optimization of a Highly Birefringent and Highly Nonlinear Silicon Photonic Crystal Fiber. *Optical and Wireless Technologies, Springer*, Singapore, 2018, С. 301-308.

80. Дианов Е. В. Достижения в области создания фотонно-кристаллических волокон и сверхширокополосных усилителей. *Lightwave Russian Edition*, 2004, №4, С. 8-11.

81. Y. Zhu, Y. Chen, P. Huray, X. Dong. Application of a 2D-CFDTD Algorithm to the Analysis of Photonic Crystal Fibers (PCFs). *Proceedings IEEE SoutheastCon 2002*.

82. А. Б. Иванов, Ю. Г. Скопин. Измерение потерь при термическом соединении оптических волокон. *Метрология и измерительная техника в связи*, 1998, №4.

83. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Вологда: Инфра-Инженерия, 2017, 932 с.

84. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка сигналов в Матлаб. Издательство: Техносфера, 2006, 616 с.

85. Васильев В. Н., Гуров И. П. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. СПб.: БХВ, Санкт-Петербург, 1998, 240 с.

86. Nielsen M. D. Optical Properties of PhotonicCrystal Fibers Expressed by the V-Parameter. *ECOC-IOOC 2003 Proceedings, Rimini*, 2003, Vol.3, pp. 416-417,

87. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания «Сайрус Системс», 1999, 672 с.

88. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. Пер. с англ. под редакцией Е.М. Дианова и В.В. Шевченко. М.: Радио и связь, 1987, 656 с.

89. Matlab & Toolboxes [Electronic resource]. URL: <http://matlab.exponenta.ru/> (Дата звернення: 08.03.2021).
90. О. Г. Ревинская. Основы программирования в Matlab : учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2016, 208 с.
91. В. П. Дьяконов MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. 2-е изд. Саратов, Профобразование, 2019, 976 с.
92. Мандель А. Е. Методы и средства измерения в волоконно-оптических телекоммуникационных системах: Учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012, 120 с.
93. А. И. Цаплин, М. Е. Лихачев. Методы измерений в волоконной оптике. Учеб. Пособие. Пермь, Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011, 227 с.
94. Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Е. В. Пешкова, М. С. Темнов. Математическое моделирование процессов и аппаратов химических и пищевых производств. Учебное пособие, Тамбов, Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014, 80 с.
95. Смирнов Г. Б., Томашевич В. Г. Основы управления в среде Matlab. Электронный образовательный ресурс. Информационный портал УрФУ, 2017, 61 с.
96. Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004, 911 с.
97. Решмин Б. И. Имитационное моделирование и системы управления. Инфра-Инженерия, 2019, 74 с.
98. І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. Автоматизація виробничих процесів. Ліра-К, 2017, 378 с.
99. Ю. Н. Федоров. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Учебно-практическое пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2008, 928 с.
100. Чен К., Джиблин П., Ирвинг А. МАТІАВ в математических исследованиях. М.: Мир, 2001, 346 с.
101. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. Москва: Техносфера, 2006, 616 с.

Наукове видання

ФИЛИПЕНКО Олександр Іванович
НЕВЛЮДОВ Ігор Шакирович
СИЧОВА Оксана Володимирівна

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ З'ЄДНАННЯ
ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ВОЛОКОН**

Монографія

Підписано до друку 17.01.2022 р.
Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Умовн. друк. арк. 8,3.
Тираж 300 прим. Зам. № 17-01.

Видавництво та друк
ФОП Іванченко І.С.
пр. Тракторобудівників, 89-а/62, м. Харків, Україна, 61135.
тел.: +38 (050/093) 40-243-50.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготівників та розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 4388 від 15.08.2012 р.
monograf.com.ua