

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

СИЧОВА ОКСАНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 681.7.068:621.38]:681.51

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

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Филипенко Олександр Іванович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
декан факультету автоматики і комп'ютеризованих
технологій, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих
технологій, автоматизації та мехатроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тимофєєв Володимир Олександрович,
Харківський національний університет міського
господарства ім. О.М. Бекетова МОН України,
професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

доктор технічних наук , професор
Доля Григорій Миколайович,
Харківський національний університет
ім. В.Н. Каразіна МОН України,
професор кафедри теоретичної та
прикладної системотехніки

Захист відбудеться «04» травня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розіслано: «01» квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. П. Плісс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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.

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 та ін.

Технології виготовлення фотонно-кристалічних волокон (ФКВ) постійно удосконалюються, а характеристики передачі сигналу в таких волокнах наближуються до параметрів стандартних оптичних волокон (ОВ). 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. 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукової та науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, зокрема НДР «Теоретичні і методологічні основи автоматизованих технологій комплексного контролю параметрів компонентів у виробництві і експлуатації волоконно-оптичних систем» (ДР №0102U003742); НДР «Теоретичні основи створення перспективних

компонентів та нових технологій їх виробництва для широкого класу волоконно-оптичних систем» (ДР №0105U002739); НДР «Конструкторсько-технологічні основи створення перспективних компонентів мікроелектромеханічних систем та технологій їх виробництва» (ДР №0108U002216); НДР «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями і їх впровадження» (ДР №0113U000358); НДР «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування і технології їх виробництва для гнучких інтегрованих схем» (ДР №0110U002594); НДР «Створення мікромініатюрних компонентів електромеханічних інтелектуальних технологічних засобів промислового обладнання і робототехніки» (ДР №0115U002433). У науково-дослідних роботах здобувачка брала участь як виконавиця.

В межах зазначених тем здобувачкою запропоновано метод визначення параметрів форми зварного з'єднання оптичних волокон, заснований на обробці зображення з'єднання, отриманого поперечним зондуванням, для виключення шумів вимірювань, ідентифікації границь оболонки оптичних волокон і визначенні параметрів зсувів волокон; вирішене завдання розробки методу контролю геометричних параметрів фотонно-кристалічних волокон, а саме діаметрів серцевини та отворів оболонки і їх розташування в поперечному перетині волокна; запропоновано метод позиціонування фотонно-кристалічних волокон в процесі їх з'єднання, досліджено технологію зварювання ФКВ; проведено контроль геометричних параметрів каскадних оптоволоконних структур та визначення місця стику двох ФКВ; розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє моделювати і візуалізувати вплив оптико-геометричних характеристик ФКВ на розподіл модового поля; розроблено автоматизовану систему позиціонування складнопрофільних оптичних волокон за кутом взаємного повороту, яка вдосконалює процес позиціонування і забезпечує більш низькі втрати в з'єднаннях.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка і вдосконалення методів автоматизованого позиціонування фотонно-кристалічних волокон для зниження оптичних втрат і підвищення якості їх з'єднань.

Мета досягається вирішенням наступних завдань:

- провести аналіз фотонно-кристалічних волокон та вплив їх структури на процеси позиціонування і виконання з'єднання;
- обґрунтувати завдання автоматизації процесів з'єднання та розробити структуру автоматизованих модулів контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон;
- розробити метод автоматизованого позиціонування ФКВ за їх осями, заснований на аналізі розподілення оптичного поля, сформованого ФКВ при поперечному зондуванні світловим променем;
- розробити метод автоматизованого позиціонування двох фотонно-кристалічних волокон за кутами взаємного повороту волокон навколо їх поздовжньої осі;
- провести експериментальну перевірку пропонованих методів позиціонування фотонно-кристалічних волокон.

Об'єкт дослідження – автоматизоване керування технологічним процесом з'єднання фотонно-кристалічних волокон.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи та системи автоматизованого керування процесами з'єднання фотонно-кристалічних волокон.

Методи дослідження. Для побудови структури системи керування позиціонуванням фотонно-кристалічних волокон використовувалися методи теорії автоматичного управління. Методами комп'ютерного моделювання розроблено моделі фотонно-кристалічного волокна та розподіли модового поля в них, досліджено вплив оптико-геометричних факторів на втрати оптичної потужності сигналу в з'єднаннях ФКВ, а також проведено перевірку пропонуваніх методів позиціонування. Вимірювання інтенсивності оптичного поля, сформованого ФКВ, реалізується методами технічного зору із застосуванням методів обробки цифрових зображень. Методи ідентифікації параметрів розташування об'єктів керування базуються на кореляційному методі. Результати теоретичних та моделюючих досліджень підтверджено методами фізичного експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів. Наведені в роботі теоретичні та експериментальні дослідження дозволили вирішити важливе наукове завдання удосконалення методів та засобів технологічного, інформаційного та математичного забезпечення автоматизованих процесів позиціонування фотонно-кристалічних волокон під час з'єднання. До нових, одержаних особисто автором, належать такі результати:

1. Вперше розроблено метод автоматизованого позиціонування поєднаних фотонно-кристалічних волокон, заснований на визначенні параметрів розташування їх осей за лініями регресії, побудованими шляхом ідентифікації координат центрів фотонно-кристалічних волокон із застосуванням методу автозгортки до вимірюваного розподілу оптичного поля фотонно-кристалічних волокон, що дозволяє підвищити якість з'єднання та зменшити втрати оптичної потужності сигналу у з'єднанні.

2. Вперше розроблено метод автоматизованого позиціонування двох фотонно-кристалічних волокон, заснований на врахуванні куту взаємного повороту волокон навколо їх поздовжньої осі, що дає змогу враховувати структуру модового поля волокна в процесі з'єднання та зменшити оптичні втрати.

3. Отримав подальший розвиток метод визначення координати центру перерізу фотонно-кристалічного волокна, який відрізняється від відомих застосуванням до сформованого при поперечному зондуванні світловим променем фотонно-кристалічного волокна одновимірною розподілу оптичного поля процедури автозгортки, що дає змогу підвищити точність визначення розташування волокна.

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

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих теоретичних результатів роботи підтверджено забезпеченням низького рівня оптичних втрат у з'єднаннях ФКВ за рахунок використання нових методів їх автоматизованого позиціонування за лінійними координатами та за кутом взаємного повороту. Практичні результати, що отримано, підтверджені актами реалізації та впровадження та доводять коректність теоретичних положень дисертаційної роботи,

високу якість розроблених методів. Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані: в лабораторії метрології та виробничій лабораторії Центру інформаційних технологій та технічного забезпечення Нововолинської філії ВАТ «Укртелеком» (акт про впровадження від 15.02.2016 р.); в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки (акт про впровадження в освітній процес Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків від 04.05.2020 р.).

Впровадження розроблених в дисертаційній роботі методів в системи автоматизованого керування процесами позиціонування та з'єднання фотонно-кристалічних волокон під час виробництва або експлуатації компонентів на їх основі знижує рівень втрат оптичної потужності на з'єднаннях на 6...10%. Результати досліджень можуть бути використані в дослідженнях та розробках, що виконуються у ДП «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (м. Харків), ДП Харківський релейний завод «Радіореле» (м. Харків), АТ «Хартрон» (м. Харків), АТ «Южкабель» (м. Харків), АТ «Одескабель» (м. Одеса) та інших організаціях та підприємствах, що вирішують проблеми створення волоконно-оптичних систем, проектування та виробництва волоконно-оптичних компонентів.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, авторці належить наступний внесок: [1] – досліджено залежність дисперсії від впливу факторів, які змінюються в процесі зварювання оптичних волокон (висоти профілю показника заломлення, радіуса серцевини, глибини та ширини проміжної оболонки); розроблено алгоритмічне забезпечення для визначення цих залежностей; [2] – сформульовано основні вимоги до програмних засобів автоматизації технологічної підготовки виробництва; [3] – розроблено метод визначення максимального діаметру модового поля фотонно-кристалічного волокна, який впроваджено у комп'ютерну програму для автоматизації процесу позиціонування оптичних волокон; [4] – розроблено архітектуру програмного засобу та виконано моделювання його роботи; [5] – запропоновано функціональну схему та алгоритм системи керування апаратом зварювання оптичних волокон, класифікацію та склад технічного контролю, який виконується в автоматизованій системі керування технологічним процесом зварювання; [6] – досліджено вплив випадкової зміни діаметра повітряних отворів та їх розташування в оболонці на експлуатаційні параметри фотонно-кристалічного волокна з кварцовою серцевиною; [7] – досліджено фактори втрат оптичного сигналу в з'єднаннях ФКВ, визначено затухання оптичного сигналу внаслідок поперечного, поздовжнього та кутового зміщень волокон, що виникають в процесі з'єднання; [8] – запропоновано метод автоматизованого контролю позиціонування ФКВ в процесі з'єднання, заснований на принципі узгодженої фільтрації в формі автозгортки; [9] – розраховано значення координат центру серцевини ФКВ, виражені через центр ваги функції інтенсивності випромінювання, проведена оцінка їх співвідношення з координатами, визначеними методом автозгортки; [10] – визначено втрати сигналу, викликані різницею ефективних площ модових полів ФКВ, що з'єднуються; [11] – досліджено метод позиціонування оптичних волокон за їх осями, побудованими на основі визначених методом автозгортки координат центру розподілу оптичного поля та їх регресією;

за положенням ліній регресії визначено значення зсувів волокон, що з'єднуються; [12] – досліджено характеристики фільтрів нижніх частот для обробки зображення оптичного поля, сформованого ОВ при поперечному зондуванні випромінюванням; для фільтру Баттерворта проведено моделювання щодо визначення порядку та частоти відсічки; [13] – пропонується метод фокусування поперечним зондуючим променем для контролю геометричних параметрів місця зварювання оптичних волокон, розглянуто параметри форми, що визначають втрати оптичної потужності в місці зварювання оптичних волокон; [14] – розроблено алгоритм обробки вимірюваного зображення оптичного поля, сформованого оптичним волокном при поперечному освітленні для визначення геометричних зміщень в процесі з'єднання; [15] – удосконалено метод, заснований на принципах узгодженої фільтрації та автозгортки для позиціонування ФКВ та контролю якості їх з'єднання; експериментально досліджено точність методу для визначення зміщень осі ФКВ; [16] – досліджено метод автозгортки для визначення положення поздовжньої осі ФКВ та визначення центру модового поля у поперечному перетині; запропонований метод дозволяє враховувати кут взаємного повороту ФКВ в процесі позиціонування; [17] – розроблено математичні моделі профілів показника заломлення оптичних волокон, запропоновано алгоритм дослідження впливу зварного з'єднання модифікованих оптичних волокон на ступінь зміни дисперсії; [18] – розглянуто питання підвищення якості з'єднання фотонно-кристалічних волокон; проведено дослідження отримання зображення розподілу оптичного поля, сформованого ФКВ у поперечному освітленні за допомогою системи PAS; [19] – представлено метод визначення максимального діаметра модового поля фотонно-кристалічного волокна; [20] – експериментально досліджено метод визначення положення максимального діаметру модового поля фотонно-кристалічного волокна за його зображенням, отриманим поздовжнім зондуванням ФКВ і вимірюванням розподілу модового поля у ближньому полі; [21] – досліджено вплив положення ФКВ відносно поздовжньої осі на розподіл модового поля і на втрати оптичної потужності у з'єднаннях; [22] – за допомогою комп'ютерного моделювання побудовано поперечні перетини оптичних волокон декількох видів та отримано їх розподіли полів основної моди; розраховано втрати потужності сигналу та побудовано графіки залежності затухання від зміщень з урахуванням розмірів модових полів волокон; [23] – проведено комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження позиціонування ФКВ методом автозгортки; ефективність і точність методу перевірялися за допомогою еталонних переміщень зображення на задану величину, контрольовану атестованим вимірником малих переміщень; [24] – досліджено вплив розподілу модового поля ФКВ на передачу оптичної потужності; визначено залежність втрат від різниці модових полів ФКВ, що з'єднуються; [25] – досліджено фактори втрат у фотонно-кристалічних волокнах та їх з'єднаннях; [26] – визначено положення осі оптичних волокон в процесі позиціонування, наводяться залежності втрат оптичної потужності від кутового, поперечного та поздовжнього зміщень; [27] – запропоновано метод визначення центру розподілу модового поля двовимірною автозгорткою, розраховані діаметри модового поля в кожному перетині, що проходить через визначений центр; [28] – розроблено автоматизовану систему визначення положення максимального діаметру модового поля ФКВ в процесі

позиціонування за кутом повороту; [29] – досліджено втрати сигналу у з'єднаннях стандартного оптичного волокна і ФКВ; [30] – проведені експериментальні дослідження впливу перешкод і значних відхилень вимірювань амплітуди оптичного поля ФКВ на визначення осі методом автозгортки; [31] – побудовано комп'ютерні моделі поперечних перетинів ФКВ з метою дослідження їх структури на передачу оптичної потужності та втрати сигналу на з'єднаннях.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (Odessa, 2020); IEEE 6th, 7th, 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (Sudak, 2013, Odessa, 2016, Sozopol, Bulgaria, 2019), IEEE Second, Third, 4th and 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (Kharkiv, 2015-2018), IEEE 6th, 8th and 10th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (Kharkiv, 2004, 2006, Sevastopol, 2010), IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (Lviv, 2008), XIV International Conference Strategy of Quality in Industry and Education. (Varna, Bulgaria, 2018), Всеукраїнська науково-практична Internet-конференція (Черкаси, 2016), Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних беспроводних мереж зв'язи» (Харків, 2015), VII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2014), IX Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» (Севастополь, 2013).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 31 науковій роботі, серед яких: 11 наукових статей (9 наукових статей у фахових наукових періодичних виданнях України з технічних наук, що індексуються міжнародними бібліометричними і наукометричними базами даних: CiteFactor, Cosmos Impact Factor, ESJI, Journal Factor, Public Knowledge Project (PKP), Academic Resource Index, WorldCat, Scientific Indexing Services (SIS), The Journals Impact Factor (JIF), International Citation Index of Journal Impact Factor & Indexing, Open Academic Journals Index (OAJI), у пошукових системах Google Scholar та ICI World of Journals, Index Copernicus, Inspec Ideas, Academic Keys, Infobase Index, Google Scholar; 1 стаття у зарубіжному науковому періодичному виданні, що індексується міжнародною наукометричною базою Scopus), 1 розділ в колективній монографії, що видана за кордоном (Латвія, м. Рига), 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, 17 тез доповідей у матеріалах наукових міжнародних конференцій, 12 з яких індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus і Web of Science. h-індекс автора у наукометричній базі Scopus – 4, у Google Scholar – 5.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, що містять основні результати роботи, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 204 сторінки, що включає 152 сторінки основного тексту, 99 рисунків (з них 30 рисунків займають площу на 17 сторінках), 9 таблиць, список використаних джерел зі 101 найменування (на 12 сторінках) та 4 додатки (на 16 сторінках).

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи, які використовувалися при вирішенні завдань досліджень. Викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, апробацію, особистий внесок здобувачки та публікації за темою дисертаційної роботи.

Перший розділ являє собою критичний огляд завдань та особливостей процесів з'єднання фотонно-кристалічних волокон. Розглянуто різновиди фотонно-кристалічних волокон, проаналізовано вплив геометрії поперечного перетину та показника заломлення на розповсюдження світла в них. Досліджено, яким чином перспективи застосування ФКВ в телекомунікаційних системах впливають на технології їх сполучення. Проаналізовано існуючі технології з'єднання оптичних волокон та виділено фактори втрат у ФКВ та їх з'єднаннях. Наведено огляд стану питання у світі та проблем, які виникають в процесі з'єднання фотонно-кристалічних волокон.

Аналіз факторів можливих втрат у з'єднаннях ФКВ показав, що вирішальною операцією в процесі з'єднання є позиціонування оптичних волокон, від якого в значній мірі залежить якість отриманого з'єднання. Перевищення припустимих значень зміщень у місцях стику ФКВ, враховуючи їх складну структуру, призводить до значно більшого росту внесених оптичних втрат порівняно із стандартними волокнами. Визначення параметрів просторового розташування ФКВ в процесі їх поєднання одне з одним або із стандартним оптичним волокном унеможлиблюється спрямованістю сучасних методів та засобів виключно на стандартні оптичні волокна та робить неможливим отримання потрібних показників якості.

З проведеного аналізу існуючих технологій з'єднань оптичних волокон з'ясовано, що для з'єднання ФКВ також можуть бути застосовані технології позиціонування за зображенням оптичного поля, отриманого поперечним зондуванням або за потужністю оптичного випромінювання, що проходить поздовж волокон. Завдання визначення параметрів позиціонування ФКВ із заданою точністю додатково ускладнюється значною кількістю різновидів та складністю оптико-геометричних структур ФКВ на відміну від стандартних, яких тільки декілька одиниць типів. При цьому слід враховувати, що це різноманіття структур постійно збільшується, оскільки саме певні структури дозволяють реалізувати специфічні оптичні властивості та будувати різні за призначенням та властивостями оптичні компоненти. На сьогоднішній день рівень припустимих втрат в з'єднанні стандартних одномодових оптичних волокон складає 0,05 дБ на зварних з'єднаннях та 0,3 дБ на роз'ємних. Отже результатом аналізу визначено потребу розробки таких методів автоматизованого позиціонування ФКВ, які б дозволили досягти не гірших значень згасання оптичного сигналу.

У **другому розділі** виконано обґрунтування завдання автоматизації процесів з'єднання ФКВ. Схема керування процесом з'єднання ФКВ передбачає послідовну реалізацію двох етапів: ідентифікації параметрів розташування керованих об'єктів, а саме двох ФКВ, та визначення поточних значень сигналів керування.

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. Відповідно до раніше визначених завдань такими типовими структурами є автоматизовані модулі контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон за лінійними координатами (рис.1) та за кутом повороту (рис. 2).

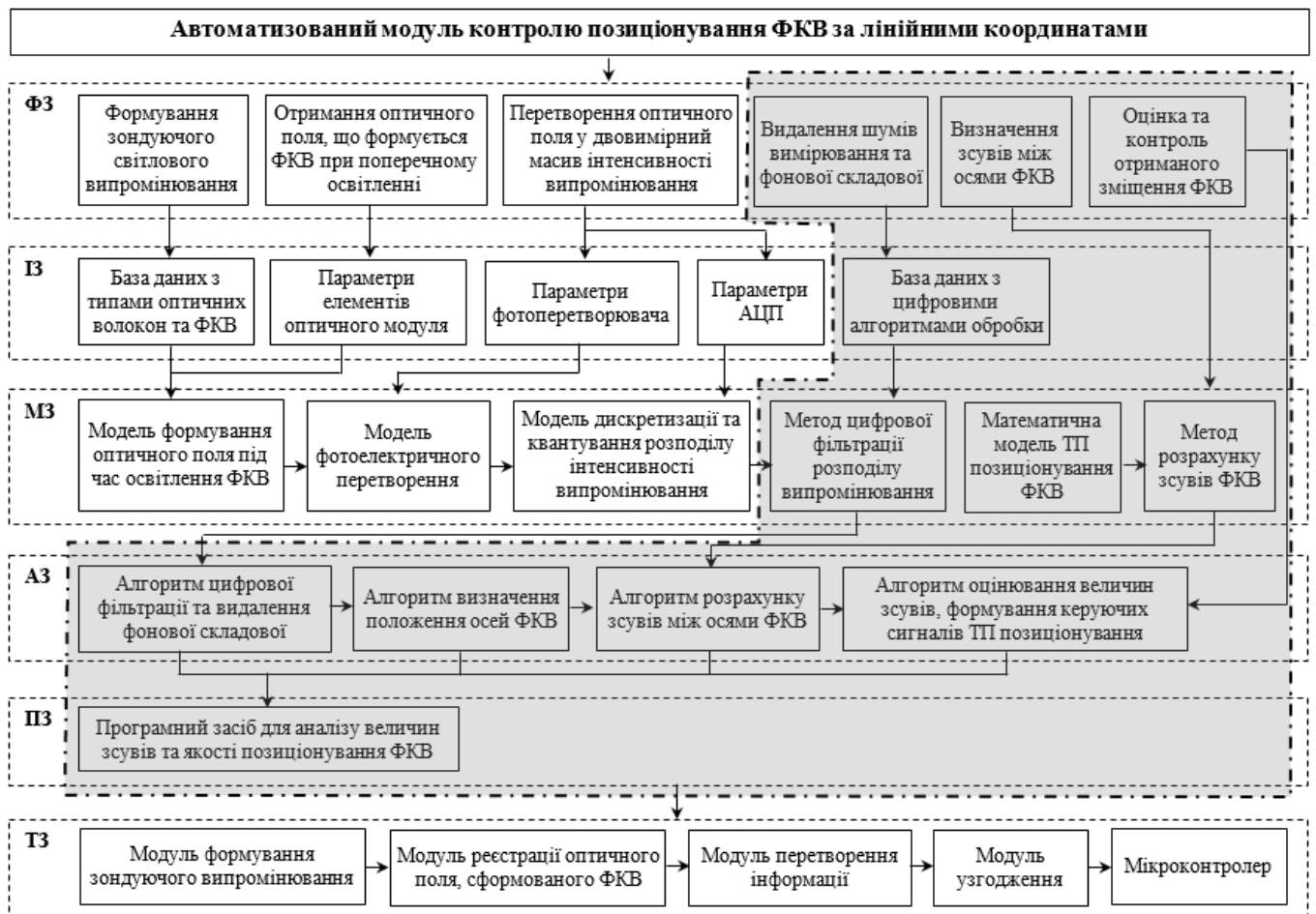


Рисунок 1 – Структурна схема автоматизованого модуля контролю позиціонування ФКВ за лінійними координатами

За результатами синтезу структури визначено специфічні завдання із розробки моделей та методів, що підлягають вирішенню та 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.

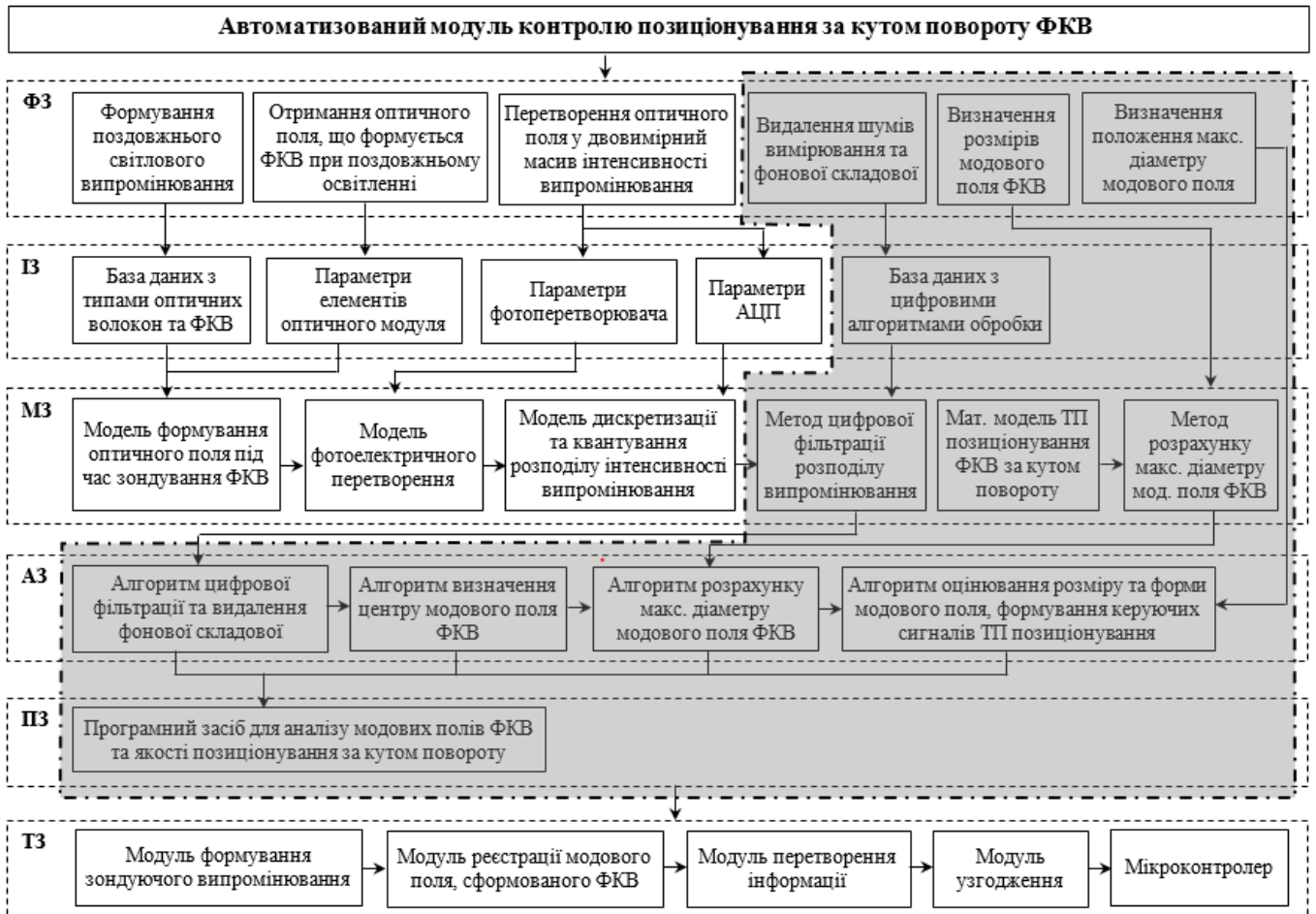


Рисунок 2. – Структурна схема автоматизованого модуля контролю позиціонування ФКВ за кутом повороту

У третьому розділі виконано розроблення та дослідження автоматизованого методу контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон в процесі з'єднання за лінійними координатами. Даний процес заснований на отриманні методом фокусування зображення оптичного поля, сформованого волокном в задній площині стосовно джерела опромінення, що освітлює волокна під прямим кутом до їх осі. Розподіл потоку випромінювання після проходження ФКВ фіксується відеокамерою та далі підлягає обробці запропонованими в роботі кореляційним методом та методом автозгортки.

З огляду на особливості ФКВ, 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, наприклад, інтегральний або засновані на стандартних методиках швидкого перетворення Фур'є чи апроксимації амплітуди поля за методом найменших квадратів будь-яким багаточленом або сплайн-функціями, не завжди задовольняють суперечливим вимогам продуктивності і точності. 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 методичку рішення даної задачі для фотонно-кристалічних волокон.

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 й з незначними спотвореннями, викликані дефектами і забрудненнями 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. Отже задача контролю позиціонування полягає у визначенні поперечного зсуву центру симетрії сигналу. В дисертаційній роботі вирішення цієї задачі пропонується здійснювати з використанням принципу погодженої фільтрації у формі автозгортки. У випадку, коли спотворення зображення викликані виключно шумом, модель сигналу в перетині розподілу інтенсивності оптичного поля можна представити у вигляді

$$\xi(x, \rho) = I(x, \rho) + n(x). \quad (1)$$

де $I(x, \rho)$ – функція розподілу інтенсивності; $n(x)$ – адитивний шум з нульовим середнім значенням; ρ – величина поперечного зсуву.

Метод позиціонування виходячи з принципів погодженої фільтрації дає змогу мінімізувати середньоквадратичну похибку у виділенні корисної складової $I(x, \rho)$ із суміші із шумом $\xi(x, \rho)$. Вихідний сигнал погодженого фільтра відповідає автоковаріаційній функції корисної складової $I(x, \rho)$ і досягає максимуму в момент точної ідентифікації цієї складової. В роботі доведено, що рішення задачі визначення зсуву центру симетрії сигналу ρ досягне без апіорного знання значень параметрів сигналу та максимальне значення авто згортки збігається зі значенням відгуку погодженого фільтра та досягається на відстані подвоєної координати зсуву $z = 2\rho$

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

Отже, ідентифікація положення центру симетрії розподілу інтенсивності оптичного поля та відповідно ФКВ зводиться до виконання операції автозгортки виміряного сигналу та визначенню положення максимуму результуючої функції. Визначені за даним методом послідовності координат центрів для кожного з ФКВ $\{x_i\}$ все ж таки мають певний стохастичний розкид. Тому для відновлення осей ФКВ та остаточного визначення параметрів взаємного розташування обох волокон запропоновано використовувати лінійне регресійне моделювання (рис.3).

Рівняння регресії для осей першого і другого ФКВ відповідно мають вигляд:

$$y_1(x_1) = a_1x_1 + b_1; y_2(x_2) = a_2x_2 + b_2.$$

За розрахованими коефіцієнтами визначається кут взаємного нахилу осей фотонно-кристалічних волокон θ :

$$\theta = \arctg \frac{a_1 + a_2}{1 - a_1a_2}. \quad (3)$$

З регресійної моделі також можна визначити поперечний зсув r_d та поздовжнє зміщення l осей ФКВ:

$$r_d = \Delta b \cdot \cos \beta_1 = (y_3(x_3) - a_1 x - b_1) \cdot \cos(\arctg(a_1)), \quad l = \frac{(x_3 - x_2)}{\cos \beta_1} + r_d \cdot \sin \beta_1. \quad (4)$$

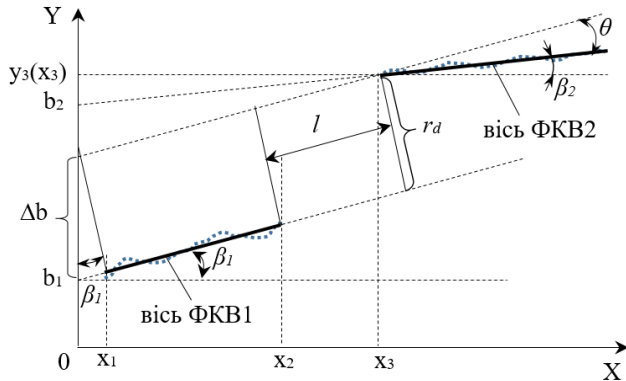
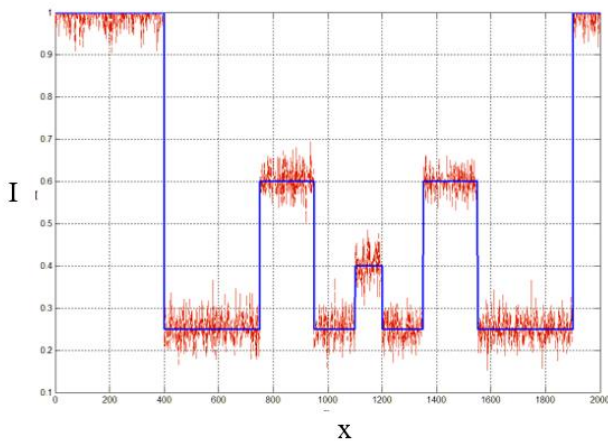


Рисунок 3 – Геометрична модель для визначення кутового нахилу ФКВ, поперечного та поздовжнього зміщення

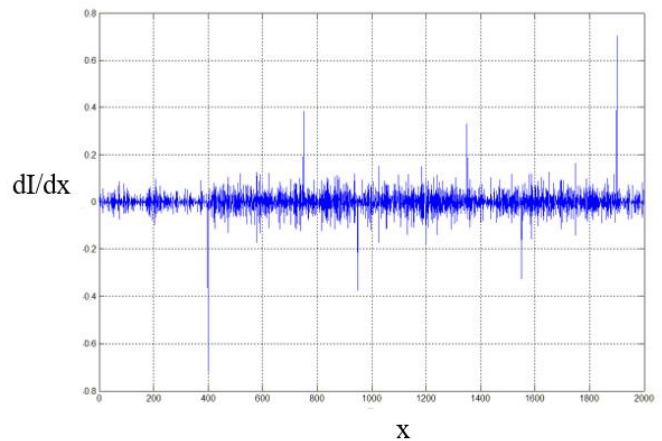
Запропонований метод автозгортки та моделі було досліджено для визначення характеристик точності визначення положення поздовжньої осі фотонно-кристалічного волокна. У ході дослідження методу автозгортки для визначення положення поздовжньої осі ФКВ, задавався тестовий вихідний розподіл інтенсивності оптичного поля $I(x)$ ($0 \leq x \leq 2000$) з амплітудою, нормованою до одиниці. Вісь симетрії даного розподілу проходить паралельно осі ординат через точку, яка визначає положення центру серцевини фотонно-

кристалічного волокна. Вплив випадкової похибки вимірювання імітувався у вигляді 10% гаусівського шуму з нульовим середнім значенням. На рис. 4, а подано зміщений на $\rho = 150$ елементів відносно середнього ($X_{cp} = 1000$) вихідний сигнал (суцільна синя лінія) та цей же сигнал з додаванням помилок вимірювання (пунктирна червона лінія).

Для виключення значного впливу фонові складові оптичного поля (ділянок, які розташовані з боків волокна) на точність розрахунків запропоновано процедуру її вилучення шляхом визначення меж волокон диференціюванням оптичного розподілу та знаходженням координат точок, в яких відбувається різка зміна інтенсивності випромінювання (рис. 4, б).



а)



б)

Рисунок 4 – Вихідний розподіл інтенсивності оптичного поля (а) та диференціал тестового сигналу (б)

Після формування сигналу з 10% помилкою та видалення фонові складові, виконано операцію автозгортки отриманого розподілу (рис. 5) та визначено координату елемента з максимальним значенням сформованого масиву $X_{max} = 2300$. Далі знайдено координату центра розподілу інтенсивності ФКВ:

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

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

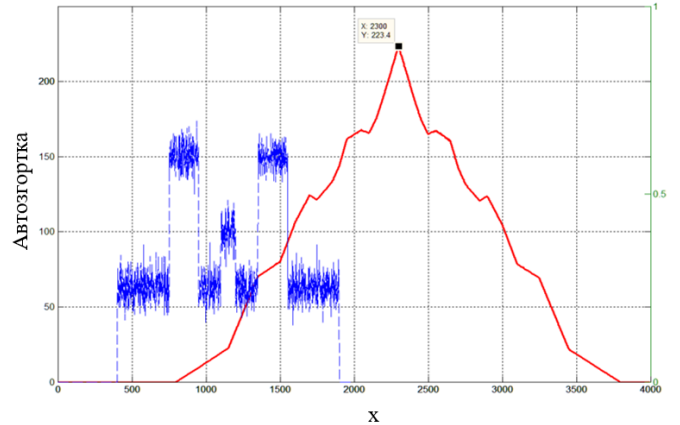


Рисунок 5 – Тестовий сигнал та його автозгортка

За результатами теоретичного обґрунтування та дослідження характеристик точності запропонованого методу розроблено структурну схему системи керування позиціонуванням за лінійними координатами (рис.6).

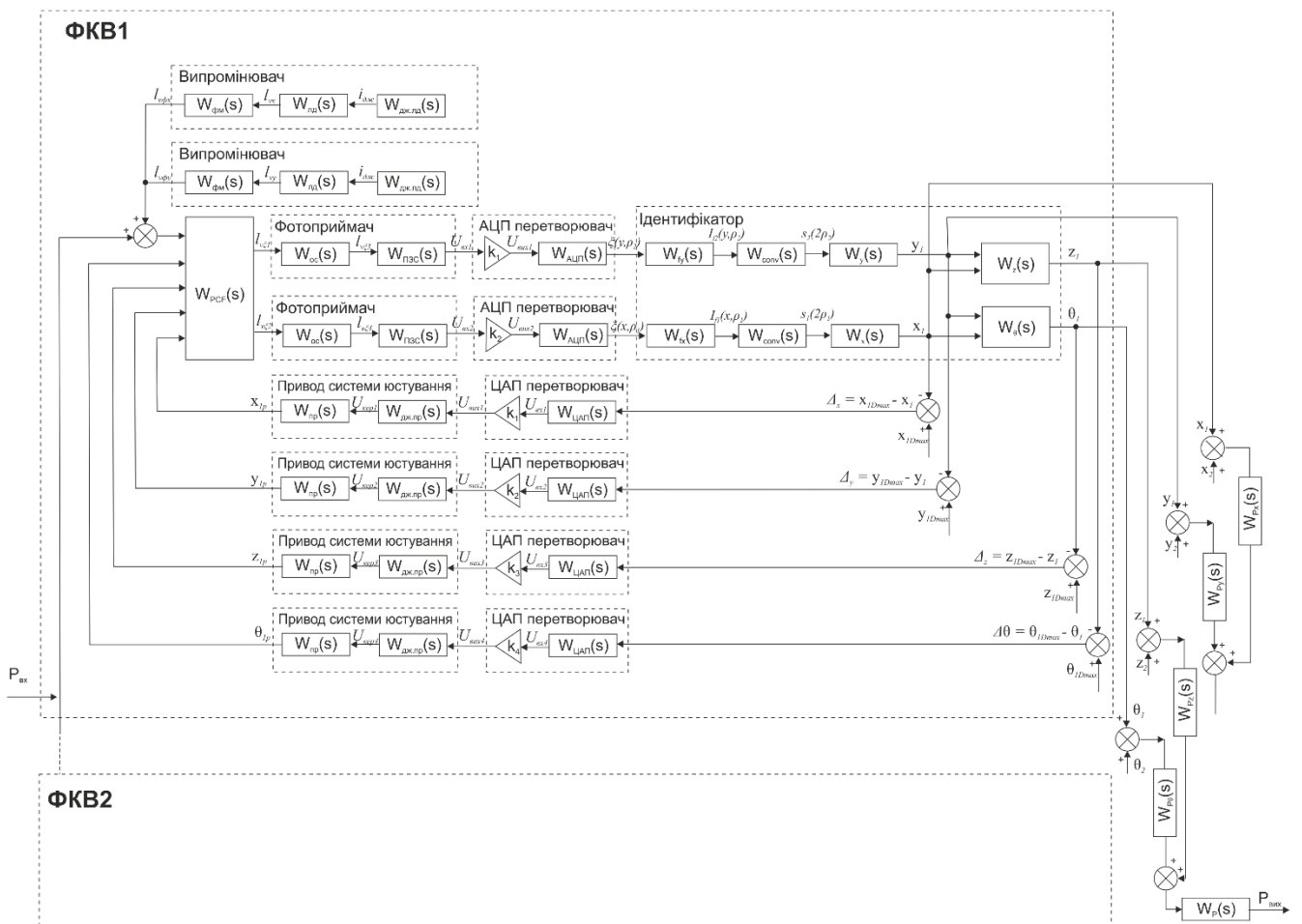


Рисунок 6 – Структурна схема системи керування позиціонуванням ФКВ за лінійними координатами

Четвертий розділ присвячено вирішенню завдання розробки та дослідження автоматизованого методу позиціонування ФКВ за кутом повороту при поздовжньому освітленні ФКВ тестовим опроміненням. Потреба цього процесу з'єднання викликана наявністю критичного впливу кутової неузгодженості несиметрично розташованих модових полів. Для дослідження втрат оптичної потужності сигналу від цієї неузгодженості у з'єднаннях ФКВ проведено низку моделюючих досліджень. Сформовано імітаційні моделі фотонно-кристалічних волокон з різними параметрами поперечного перетину (змінювалися діаметр серцевин, n , кількість отворів в оболонці та відстань між ними) та модель стандартного одномодового волокна (рис.7, а). Шляхом програмного моделювання отримано їх розподіли поля основної моди (рис. 7, б) та досліджено вплив поздовжнього, поперечного та кутового відхилень на втрати оптичної потужності сигналу для декількох різних комбінацій з'єднань ФКВ між собою та зі стандартним оптичним волокном. Доведено, що окрім керування координатами уздовж та поперек осей ФКВ невід'ємним етапом керування повинно бути кутове (обертове) позиціонування для зведення до мінімуму кутової неузгодженості ФКВ.

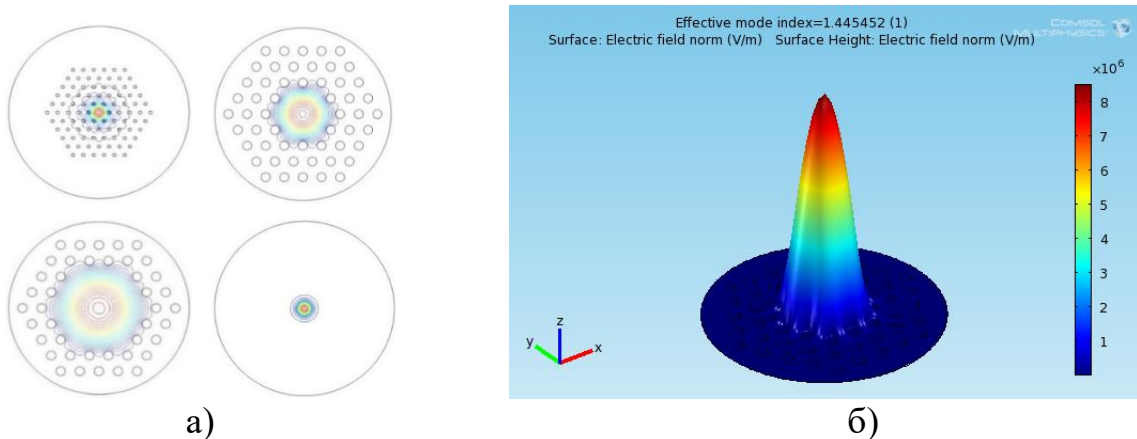


Рисунок 7 – Моделі оптичних волокон, що досліджувалися (а) та розподіл поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм (б)

Результати моделювання для декількох різних комбінацій з'єднань ФКВ між собою та зі стандартним оптичним волокном дозволили сформулювати вимоги до критичних значень параметрів позиціонування.

Також в розділі виконано дослідження застосування методу автозгортки, запропонованого в попередньому розділі, у випадку позиціонування ФКВ за розподілом модового поля в перетині ФКВ, що є підґрунтям для розробки методу позиціонування за кутом повороту навколо поздовжньої осі. Для імітаційної моделі ФКВ з радіусом серцевини 19,7 мкм, діаметром отворів в оболонці 6,4 мкм та відстанню між отворами 13,2 мкм отримано розподіл модового поля основної моди на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм (рис. 8, а). Зменшення похибки обчислень реалізовано фільтрацією отриманого розподілу модового поля фільтром Баттерворта нижніх частот четвертого порядку та нормованою частотою зрізу $w = 0,5\pi$ рад/с. Для визначення центру модового поля у поперечному перетині ФКВ розрахована двовимірний автозгортка цього розподілу (рис. 8, б).

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).

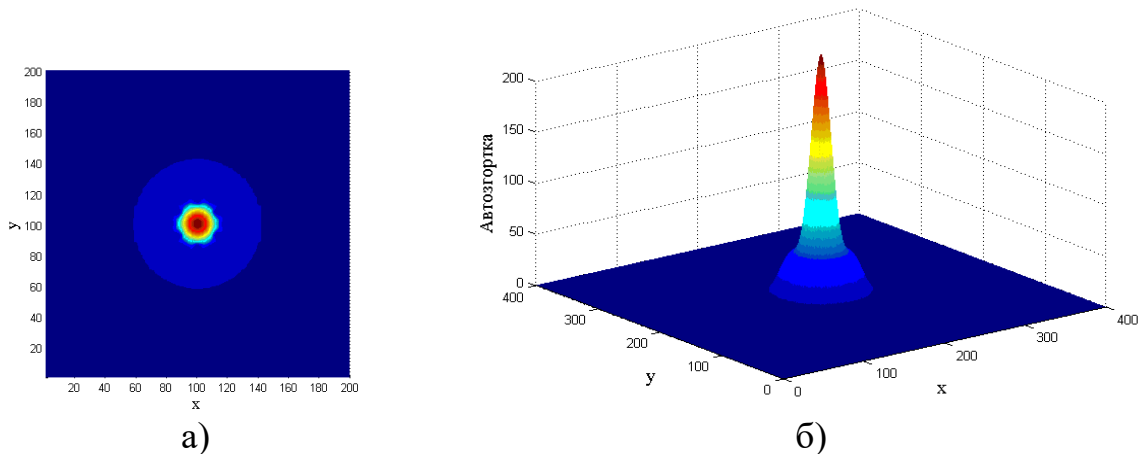


Рисунок 8 – Розподіл модового поля ФКВ у поперечному перетині (а) та автозгортка розподілу інтенсивності модового поля (б)

Перетин, в якому діаметр модового поля буде максимальним, пропонується визначати за рівнянням перетину, що проходить через центр розподілу модового поля:

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

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.9, а).

Розмір модового поля у перетині, що проходить через центр ФКВ, визначається похідною функції розподілу інтенсивності модового поля (рис. 9, б).

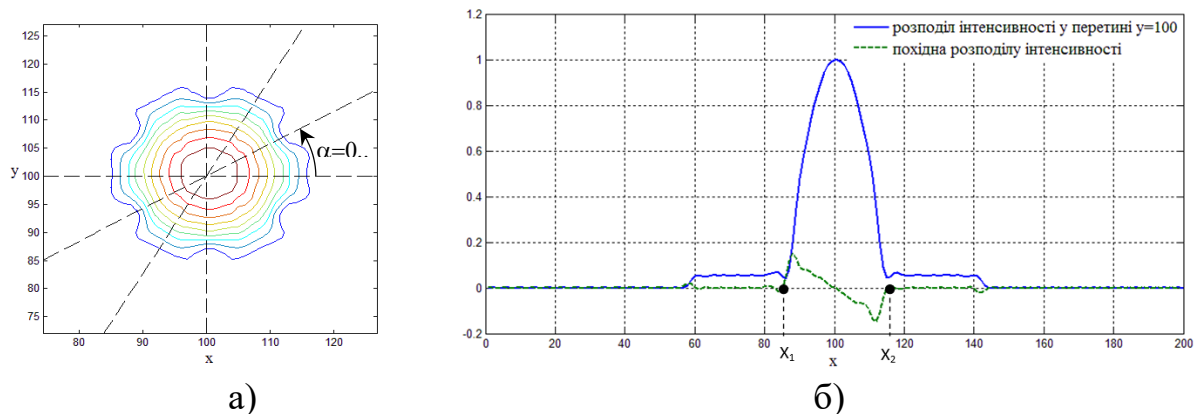


Рисунок 9 – Лінії (перетини), що проходять через центр модового поля ФКВ, визначений методом автозгортки (а) та похідна розподілу інтенсивності модового поля в перетині ФКВ (б)

За результатами досліджень розроблено структурну схему системи керування позиціонуванням за кутом оберту ФКВ навколо осі (рис.10).

Таким чином, за допомогою запропонованого методу визначення положення перетину з максимальним розміром модового поля та синтезованої системи керування позиціонуванням двох фотонно-кристалічних волокон під час виконання з'єднання можна зменшити оптичні втрати до 0,62 дБ.

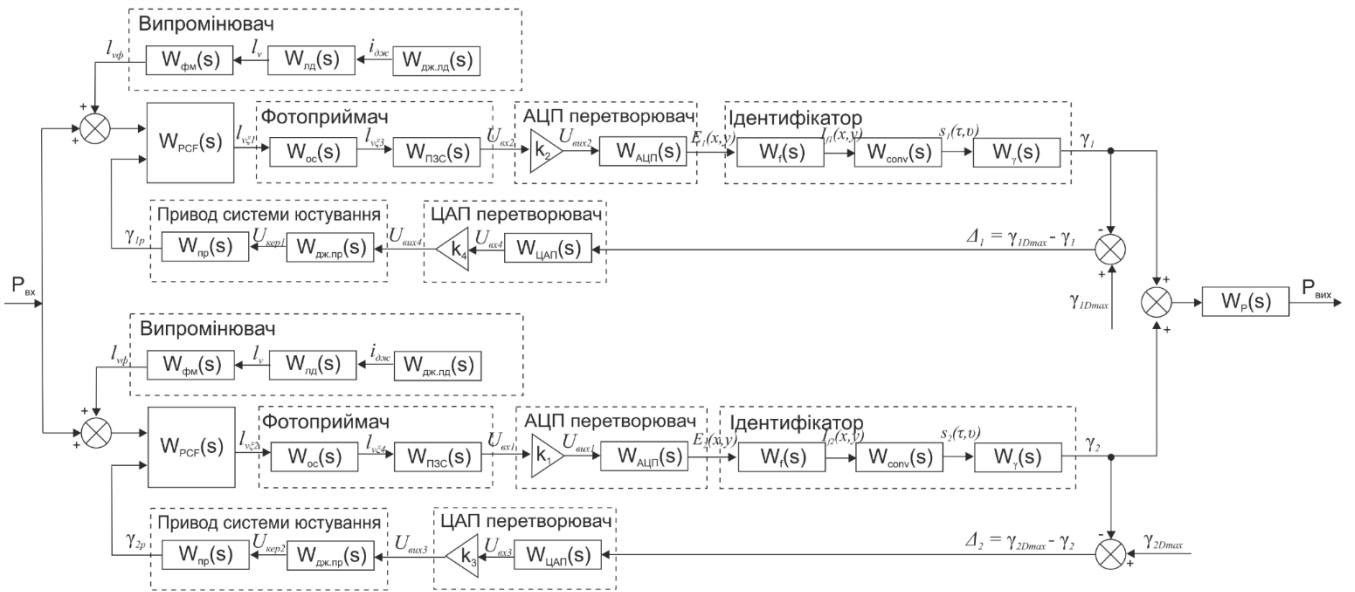


Рисунок 10 – Структурна схема системи керування позиціонуванням ФКВ за кутом повороту навколо поздовжньої осі

У п'ятому розділі за допомогою фізичних експериментів досліджено застосування методу автозгортки для процесу позиціонування ФКВ за лінійними координатами та за кутом повороту навколо поздовжньої осі.

Дослідження запропонованого в роботі методу контролю позиціонування ФКВ за лінійними координатами здійснювалось на автоматизованій установці зварювання оптичних волокон Fujikura. Чутливість і точність методу у ході експериментальних досліджень перевірялися за допомогою еталонних зсувів зображень на задану величину, які контролювалися атестованим вимірювачем малих переміщень «Мікрон-02», точність контролю 0,02 мкм. (рис. 11).

Зображення оптичного поля, сформованого зразком ФКВ при поперечному зондуванні світловим колімованим пучком під прямим кутом щодо осі, подано на рис. 12, а, а одновимірний розподіл інтенсивності оптичного поля в поперечному перетині ($i = 200$) та результат фільтрування на рис. 12, б.

Для кожного перетину видалено фонову складову, розраховано автозгортку отриманого розподілу та за координатам максимуму автозгортки визначено координати центру перетину (рис. 13, а). Послідовне застосування даної процедури уздовж лінійної координати визначило одновимірний масив з випадковими

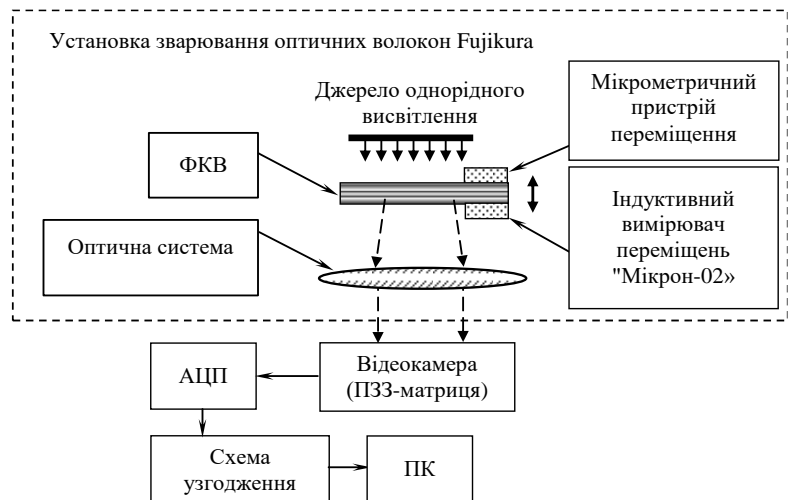


Рисунок 11 – Схема експериментальної установки дослідження методу позиціонування за лінійними координатами

значеннями розрахованих методом автозгортки центрів перетинів на підставі яких побудовано лінію регресії. За регресійними коефіцієнтами розраховано поперечний та поздовжній зсув осей ФКВ, а також кут їх нахилу (рис. 13, б).

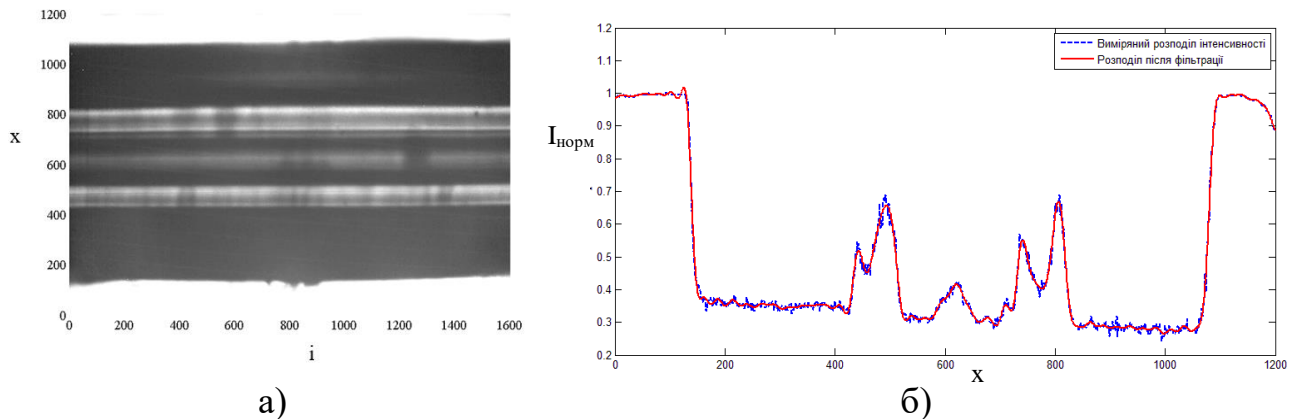


Рисунок 12 – Інтенсивність оптичного поля при поперечному зондуванні ФКВ (а) та одновимірний розподіл інтенсивності (б)

Порівняння розробленого методу автозгортки з існуючим інтегральним методом підтвердило результати імітаційних досліджень у попередніх розділах та показало, що метод автозгортки має похибку визначення координати осі до 2%, а інтегральний метод до 8%, що складає до 2 мкм зміщення.

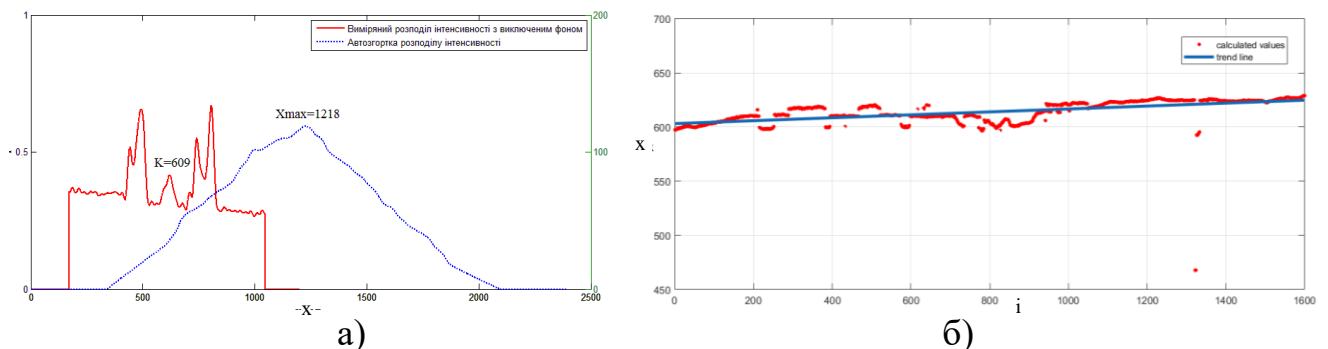
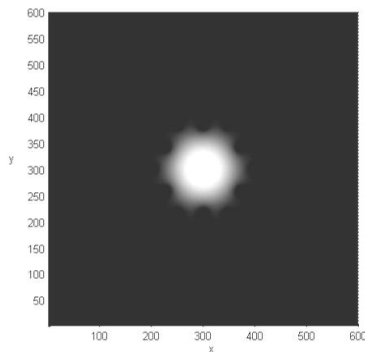


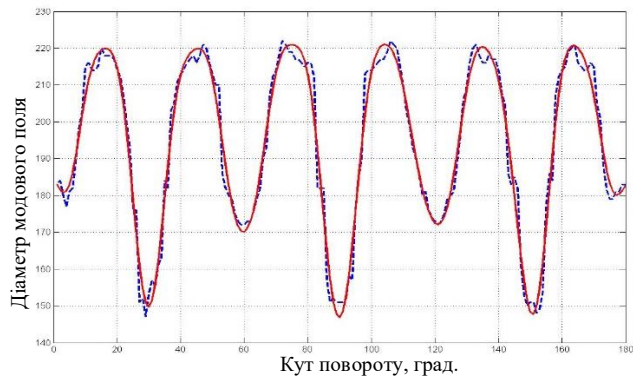
Рисунок 13 – Вимірний розподіл інтенсивності поля з виключеним фоном та його автозгортка (а) та розрахований центр серцевини ФКВ (б)

Дослідження методу позиціонування за максимальним діаметром модового поля ФКВ проведені на типовій установці, що реалізує метод ближнього поля і містить оптичну систему, багатоелементний ПЗЗ-фотоприймач, АЦП і керуючий персональний комп'ютер. Розподіл оптичного поля ФКВ отримано введенням випромінювання в торець волокна (рис. 14, а). Розраховано діаметри модового поля в кожному перетині, які проходять через центр, визначений методом автозгортки (рис. 14, б).

Таким чином, максимальний діаметр модового поля знаходиться у двох перетинах, що проходять через центр розподілу під кутами 75° і 105° . Позиціонування ФКВ можна проводити за будь-яким з них. Розрахунки показали, що різниця діаметрів модових полів ідентичних волокон може досягти 14 мкм, що призведе до втрат сигналу за цим параметром у 0,62 дБ.



а)



б)

Рисунок 14 – Вимірне зображення модового поля ФКВ (а) та залежність діаметра модового поля ФКВ від кута повороту перетину (б)

У додатках представлено список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації; код програми, який реалізує запропонований метод автозгортки для визначення осі ФКВ за зображенням оптичного поля, сформованого ним при поперечному зондуванні світловим променем та для визначення положення максимального діаметра модового поля ФКВ при поздовжньому зондуванні; свідоцтва про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми; акти про реалізацію і впровадження результатів дисертаційної роботи у лабораторії метрології, виробничій лабораторії, та в освітній процес Харківського національного університету радіоелектроніки.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі розв'язано 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. Основними результатами дисертаційної роботи є:

1. Проведено аналіз технологічних процесів з'єднань фотонно-кристалічних волокон, досліджено вплив структури ФКВ на процеси позиціонування і з'єднання, виділено фактори втрат у ФКВ та їх з'єднаннях

2. Обґрунтовано завдання автоматизації процесів з'єднання ФКВ, розроблено структурні схеми автоматизованого модуля контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон та системи керування позиціонуванням за лінійними координатами та за кутом повороту.

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

4. Отримав подальший розвиток метод визначення координати центру одновимірного розподілу оптичного поля, сформованого фотонно-кристалічним волокном при поперечному зондуванні світловим променем, який засновано на визначенні автозгортки даного розподілу.

5. Розроблено метод позиціонування ФКВ за їх осями, заснований на аналізі розподілення оптичного поля, сформованого ФКВ при поперечному зондуванні світловим променем, і побудованим на основі визначених методом автозгортки координат центру розподілу оптичного поля фотонно-кристалічних волокон та їх регресією.

6. Проведено комп'ютерне моделювання, з метою визначення точності пропонуваніх методів. Побудовано декілька моделей фотонно-кристалічних волокон з різними параметрами поперечного перетину. Розраховано значення втрат оптичної потужності сигналу для поздовжнього, поперечного та кутового відхилень, що виникають під час з'єднань волокон. Розрахунки проводилися для декількох різних комбінацій з'єднань ФКВ між собою та зі стандартним оптичним волокном. Визначено, 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 ФКВ.

7. Розроблено метод автоматизованого позиціонування двох фотонно-кристалічних волокон, який враховує кут взаємного повороту волокон навколо їх поздовжньої осі, що дало 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. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення, що реалізує пропонувані метод і дозволяє автоматизувати процес контролю позиціонування фотонно-кристалічних волокон за розміром і формою модового поля ФКВ, на яке отримано авторське свідоцтво на твір.

8. Проведені експериментальні дослідження розроблених методів позиціонування ФКВ при поперечному та поздовжньому освітленні. 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%.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані в лабораторії метрології та виробничої лабораторії Центру інформаційних технологій та технічного забезпечення Нововолинської філії ВАТ «Укртелеком», а також в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Filipenko A.I., Sychova O.V., Legka O.V. "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 (індексується наукометричною базою Scopus).

2. 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 у колективній монографії, м. Рига, Латвія).

3. *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.*
4. *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.*
5. Филипенко О.І., Сичова О.В. Застосування автоконволюційного методу аналізу зображень фотонно-кристалічних волокон в автоматизованій системі керування процесом їх з'єднання. *Технология приборостроения*. 2014. № 3. С. 17-21 (Наукове фахове видання України).
6. 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).
7. Филипенко О.І., Сичова О.В. Моделювання впливу структури фотонно-кристалічних волокон на розподіл модового поля та втрати оптичного сигналу в їх з'єднаннях. *Радиотехника*. Харків: ХНУРЕ. 2012. Вып. 171. С. 327-331. (Наукове фахове видання України).
8. 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).
9. Филипенко А.И Сычева О.В. Метод определения пространственного расположения фотонно-кристаллических волокон в процессе соединения. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ". 2008. №1 (28). С. 56-63. (Наукове фахове видання України).
10. Филипенко А.И., Сычева О.В. Исследование зависимости передачи сигнала от разности площадей модовых полей соединяемых фотонно-кристаллических волокон. *Радиотехника*. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харків: ХНУРЕ. 2006. Вып. 147. С. 74 -78. (Наукове фахове видання України).
11. 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.
12. Филипенко А.И., Сычева О.В., Опфер С.В. Выбор цифрового фильтра для обработки излучения оптического волокна. *Радиотехника*. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харків: ХНУРЕ. 2005. Вып. 143. С.113-118. (Наукове фахове видання України).
13. Морщаков Е.А., Овчаренко В.Е., Сычева О.В. Исследование метода контроля параметров формы сварного соединения оптических волокон. *Технология приборостроения*. Научн.-техн. журнал. Харків: НИТИП. 2004. №1. С.13-16. (Наукове фахове видання України).

14. 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).
15. 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).
16. 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).
17. 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).
18. 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).
19. 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).
20. 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).
21. 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).
22. 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).

23. 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).

24. 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).

25. 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).

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

27. 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).

28. 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 Інтернет-конференції*. Черкаси, 2016. С.60-62.

29. 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: ХНУРЕ, 2015. С. 157-159 с.

30. 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.

31. 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. Гімплевич. Севастополь: СевНТУ, 2013. С.187.

АНОТАЦІЯ

Сичова О. В. Автоматизація процесів з'єднання фотонно-кристалічних волокон. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню важливого та актуального науково-прикладного завдання розробки методів та засобів технологічного, інформаційного та математичного забезпечення, які гарантують задані параметри процесів з'єднання фотонно-кристалічних волокон та відповідно низькі оптичні втрати у їх з'єднаннях.

В роботі виконано теоретичне обґрунтування побудови автоматизованих систем керування процесами позиціонування фотонно-кристалічних волокон в їх з'єднанні. Вперше розроблено метод автоматизованого позиціонування поєднаних фотонно-кристалічних волокон, заснований на визначенні параметрів розташування їх осей за лініями регресії, побудованими шляхом ідентифікації координат центрів фотонно-кристалічних волокон із застосуванням методу автозгортки до виміряного розподілу оптичного поля фотонно-кристалічних волокон, що дозволяє підвищити якість з'єднання та зменшити втрати оптичної потужності сигналу у з'єднанні.

Вперше розроблено метод автоматизованого позиціонування двох фотонно-кристалічних волокон, заснований на врахуванні куту взаємного повороту волокон навколо їх поздовжньої осі, що дає змогу враховувати структуру модового поля волокна в процесі з'єднання та зменшити оптичні втрати.

Отримав подальший розвиток метод визначення координати центру перерізу фотонно-кристалічного волокна, який відрізняється від відомих застосуванням до сформованого при поперечному зондуванні світловим променем фотонно-кристалічного волокна одновимірною розподілу оптичного поля процедури автозгортки, що дає змогу підвищити точність визначення розташування волокна.

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

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.

Практичне значення отриманих теоретичних результатів роботи підтверджено забезпеченням низького рівня оптичних втрат у з'єднаннях ФКВ за рахунок використання нових методів їх автоматизованого позиціонування за лінійними координатами та за кутом взаємного повороту. Практичні результати, що отримано, підтверджені актами реалізації та впровадження та доводять коректність теоретичних положень дисертаційної роботи, високу якість розроблених методів. Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані: в лабораторії метрології та виробничій лабораторії Центру інформаційних технологій та технічного забезпечення

Нововолинської філії ВАТ «Укртелеком» (акт про впровадження від 15.02.2016 р.); в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки (акт про впровадження в освітній процес Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків від 04.05.2020).

Впровадження розроблених в дисертаційній роботі методів в системи автоматизованого керування процесами позиціонування та з'єднання фотонно-кристалічних волокон під час виробництва або експлуатації компонентів на їх основі знижує рівень втрат оптичної потужності на з'єднаннях на 6...10%. Результати досліджень можуть бути використані в дослідженнях та розробках, що виконуються у ДП «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (м. Харків), ДП Харківський релейний завод «Радіореле» (м. Харків), АТ «Хартрон» (м. Харків), АТ «Южкабель» (м. Харків), АТ «Одескабель» (м. Одеса) та інших організаціях та підприємствах, що вирішують проблеми створення волоконно-оптичних систем, проектування та виробництва волоконно-оптичних компонентів.

Ключові слова: фотонно-кристалічне волокно, позиціонування, втрати сигналу, контроль, автоматизована система керування, процес з'єднання.

ABSTRACT

Sychova O. V. Automation of photonic crystal fibers connection processes. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.07 – automation of control processes. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation work is dedicated to the decision of an important and actual scientific and applied task of methods and means development of technological, informational and mathematical maintenance which guarantee the set parameters of photonic crystal fibers connection processes and accordingly low optical losses in their connections.

Theoretical substantiation of construction of automated control systems of photonic crystal fibers positioning processes at their connection is executed in the work. The result was the further development and improvement of mathematical software complex through the development of methods for automated positioning of photonic crystal fibers in their axes and mode field distribution. The first method is based on autoconvolution method sequentially determined of the optical field distribution center coordinates, which is measured in the rear planes of photonic crystal fibers perpendicularly illuminated and represented by a linear regression model. This has improved the quality of the connection and reduced the loss of signals optical power in the connection. The second method allows to coordinate the distribution of mode fields at the ends of longitudinally excited photonic crystal fibers by determining and returning the angle of mutual rotation of the fibers around their longitudinal axis. This made it possible to take into account the structure of the mode field of the fiber during the connection process and to reduce the optical losses.

Modeling and physical experimental researches which have proved achievement of the necessary indicators of photonic crystal fibers positioning accuracy and, as a result, improvement of their connections quality characteristics are carried out.

Keywords: photonic crystal fiber, positioning, signal loss, control, automated control system, connection process.