

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра приладів і систем орієнтації та навігації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.372

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Бурау Н.І.
(підпис) (прізвище, ініціали)

“ ___ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва спеціальності)

на тему: Моделювання процесу вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика

Виконав : студент б курсу, групи ПГ-71мп
(шифр групи)

_____ Мартинюк Максим Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Півторак Д.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант доц., к.е.н. Бояринова К.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент доц., к.т.н. Маркіна О.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
РЕФЕРАТ.....	5
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	12
1.1. Аналіз методів моніторингу стану об’єктів	12
1.2. Класифікація деформацій.....	17
1.3. Огляд датчиків для систем моніторингу	20
1.3.1. Дротовий датчик.....	20
1.3.2. Фольгові датчики.....	21
1.3.3. Напівпровідникові тензодатчики.....	21
1.3.4. Високотемпературні тензодатчики.....	22
1.3.5. Волоконно-оптичні датчики.....	22
1.3.6. Волоконно-оптичні датчики на основі брегівських решіток.....	24
1.3.7. Квазірозподілені і розподілені волоконно-оптичні датчики на брегівських решітках.....	27
1.4. Волоконно-оптичні датчики у системах моніторингу об’єктів.....	29
1.5. Висновки до розділу 1.....	31
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД НА ОСНОВІ БРЕГІВСЬКИХ РЕШІТОК.....	32
2.1. Основні характеристики волоконно-оптичної брегівської решітки.....	32
2.2. Розробка математичної моделі волоконно-оптичного датчика.....	35
2.3. Методика побудови інформаційно-вимірювальної системи на основі брегівських датчиків.....	38
2.4. Аналіз існуючих методів для побудови волоконно-оптичних систем на основі брегівських решіток.....	40
2.4.1. Побудова волоконно-оптичної системи з використанням перебудовуючих по довжині хвилі джерел випромінювання.....	42

2.4.2. Побудова волоконно-оптичної системи із використанням ширококутових джерел випромінювання.....43

2.4.3. Побудова волоконно-оптичної системи за допомогою широколінійного джерела і приймача вимірювання.....44

2.5. Висновки до розділу 2.....47

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ НА ОСНОВІ БРЕГІВСЬКИХ РЕШІТОК.....48

3.1. Моделювання процесу вимірювання ВОД на основі брегівських решіток без впливу деформації.....48

3.2. Моделювання процесу вимірювання ВОД на основі брегівських решіток з впливом деформації.....50

3.3. Моделювання процесу вимірювання ВОД на основі брегівських решіток з шумом та деформацією.....52

3.4. Визначення відносних похибок для знаходження відносної деформації ВОД на основі брегівських решіток.....54

3.5. Висновки до розділу 355

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА»56

4.1. Опис ідеї.....57

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....59

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....61

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....68

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....70

4.6. Висновки до розділу 4.....73

ВИСНОВКИ.....78

ЛІТЕРАТУРА.....80

ДОДАТОК

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ПЗ – показник заломлення
- СКП – середня квадратична похибка
- ФРЕ – фотореактивний ефект
- ВБР – волоконна брегівська решітка
- ІВС – інформаційно-вимірювальна система
- ВОД – волоконно-оптичний датчик
- ВС – волоконний світловод
- ГНСС – глобальна навігаційна супутникова система
- ШСЗ – штучний супутник Землі
- ДД – дротяний датчик
- ФД – фольговий датчик
- НД – напівпровідниковий датчик
- ВТД – високотемпературний датчик
- ГМ – геодезичний моніторинг
- ГН – геометричне нівелювання
- ЛС – лазерне сканування
- ОВ – оптичне волокно
- ПЗЗ – прилад із зарядним зв'язком
- ФПП – фотоприймальний пристрій
- ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

РЕФЕРАТ

Актуальність. Актуальність теми полягає в тому, що виникає потреба моніторингу та перевірки технічного стану різних інженерних об'єктів на наявність деформацій, тріщин, для забезпечення надійності, міцності, прогнозування граничного терміну експлуатації та безвідмовної роботи в окремих елементах і вузлах конструкцій.

Моніторинг за допомогою тензодатчиків на сьогоднішній день не дає точних результатів, так як тензодатчики поступаються волоконно-оптичним датчикам за своєю точністю, та мають кращі властивості та можливості для реалізації їх у сучасних системах моніторингу.

Об'єкт дослідження. Процес вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика.

Предмет дослідження. Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських решіток.

Мета роботи. Змоделювати процес вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розглянути стан проблеми моніторингу деформації.
2. Дослідити характеристики ВОД на основі брегівських решіток.
3. Промоделювати процес вимірювання деформації ВОД.
4. Розробити стартап-проект «Моделювання процесу вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика».

Наукова новизна. Удосконалено схему каналу вимірювання деформації брегівським волоконно-оптичним датчиком комплексної системи моніторингу за рахунок виключення з неї спектроаналізатора і перенесення його функцій у програмну частину.

Практична цінність. Полягає у використанні волоконно-оптичних датчиків на основі брегівських решіток у системах моніторингу для вирішення задач контролю напружено-деформованого стану інженерних споруд.

Апробація результатів. Результати дослідження висвітлені на XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень».

Публікації. За темою магістерської дисертації опубліковано 1 працю конференцій.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з 4 розділів та висновків, 22 рисунків, 23 таблиць, списку використаних джерел із 41 позицій та 1 додатку. Загальний обсяг роботи – 84 сторінки, серед яких основна частина викладена на 78 сторінках.

Ключові слова. Моніторинг, методи моніторингу, моделювання, деформації, оптичне волокно, волоконно-оптичний датчик, волоконно-оптична система, волоконні брегівські решітки, брегівська довжина хвилі, період решітки, показник заломлення.

РЕФЕРАТ

Актуальность. Актуальность темы заключается в том, что возникает потребность мониторинга и проверки технического состояния различных инженерных объектов на наличие деформаций, трещин, для обеспечения надежности, прочности, прогнозирования предельного срока эксплуатации и безотказной работы в отдельных элементах и узлах конструкций.

Мониторинг с помощью тензодатчиков на сегодняшний день не дает точных результатов, так как тензодатчики уступают волоконно-оптическим датчикам по своей точности, и имеют лучшие свойства и возможности для реализации их в современных системах мониторинга.

Объект исследования. Процесс измерения деформации с помощью волоконно-оптического датчика.

Предмет исследования. Волоконно-оптический датчик на основе брэгговских решеток.

Цель работы. Смоделировать процесс измерения деформации с помощью волоконно-оптического датчика.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть состояние проблемы мониторинга деформации.
2. Исследовать характеристики ВОД на основе брэгговских решеток.
3. Промоделировать процесс измерения деформации ВОД.
4. Разработать стартап-проект «Моделирование процесса измерения деформации с помощью волоконно-оптического датчика».

Научная новизна. Усовершенствована схема канала измерения деформации брэгговским волоконно-оптическим датчиком комплексной системы мониторинга за счет исключения из нее спектроанализатора и переноса его функций в программную часть.

Практическая ценность. Заключается в использовании волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток в системах мониторинга для

решения задач контроля напряженно-деформированного состояния инженерных сооружений.

Апробация результатов. Результаты исследования освещены на XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Эффективность инженерных решений».

Публикации. По теме магистерской диссертации опубликовано 1 труд конференций.

Структура и объем работы. Работа состоит из 4 глав и выводов, 22 рисунков, 23 таблиц, список использованных источников из 40 позиций и 1 приложения. Общий объем работы – 84 страницы, среди которых основная часть изложена на 78 страницах.

Ключевые слова. Мониторинг, методы мониторинга, моделирование, деформации, оптическое волокно, волоконно-оптический датчик, волоконно-оптическая система, волоконные брэгговские решетки, брэгговская длина волны, период решетки, показатель преломления.

ABSTRACT

Topicality. The urgency of the topic is that there is a need for monitoring and verification of the technical condition of various engineering objects for the presence of deformations, cracks, for reliability, durability, prediction of the limiting period of operation and failure-free operation in separate elements and units of structures.

Monitoring with strain gauges today does not give exact results, since strain gauges inferior to fiber-optic sensors in their accuracy, and have better properties and opportunities for their implementation in modern monitoring systems.

Object of study. The process of measuring deformation using a fiber-optic sensor.

Subject of study. Fiber-optic sensor based on the Bragg's gratings.

The goal of the work. Modulate the deformation measurement process using a fiber optic sensor.

To achieve this goal, the following tasks must be solved:

1. Consider the state of the problem of monitoring deformation.
2. Explore the characteristics of fiber optic sensor based on Bragg's gratings.
3. To model the process of measuring the deformation of a fiber optic sensor.
4. Develop a startup project "Simulation of the deformation measurement process using a fiber-optic sensor".

Scientific novelty. The scheme of the deformation channel measurement channel by the Bragg's fiber-optic sensor of the complex monitoring system is improved due to the exclusion of the spectroanalyser from it and the transfer of its functions to the program part.

Practical value. It is necessary to use fiber-optic sensors based on the Bragg's gratings in monitoring systems for solving the problems of controlling the stress-strain state of engineering structures.

Test results. The results of the study are highlighted at the XIV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Efficiency of Engineering Solutions".

Publications. On the theme of the master's dissertation published 1 work of conferences.

Structure and scope of work. The work consists of 4 sections and conclusions, 22 figures, 23 tables, the list of sources used from 40 positions and 1 application. The total volume of work – 84 pages, among which the main part is set out on the 78 pages.

Keywords. Monitoring, methods of monitoring, modeling, deformation, optical fiber, fiber optic sensor, fiber-optic system, fiber Bragg grating, Bragg wavelength, grating period, refractive index.

ВСТУП

Актуальність. Актуальність теми полягає в тому, що виникає потреба моніторингу та перевірки технічного стану різних інженерних об'єктів на наявність деформацій, тріщин, для забезпечення надійності, міцності, прогнозування граничного терміну експлуатації та безвідмовної роботи в окремих елементах та вузлах конструкцій.

Моніторинг за допомогою тензодатчиків на сьогоднішній день не дає точних результатів, так як тензодатчики поступаються волоконно-оптичним датчикам за своєю точністю, та мають кращі властивості та можливості для реалізації їх у сучасних системах моніторингу.

Об'єкт дослідження. Процес вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика.

Предмет дослідження. Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських решіток.

Мета роботи. Змоделювати процес вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розглянути стан проблеми моніторингу деформації.
2. Дослідити характеристики ВОД на основі брегівських решіток.
3. Промоделювати процес вимірювання деформації ВОД.
4. Розробити стартап-проект «Модельовання процесу вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика».

Наукова новизна. Удосконалено схему каналу вимірювання деформації брегівським волоконно-оптичним датчиком комплексної системи моніторингу за рахунок виключення з неї спектроаналізатора і перенесення його функцій у програмну частину.

Апробація результатів. Результати дослідження доповідалися на XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень».

Публікації. За темою магістерської дисертації опубліковано 1 працю конференцій.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Аналіз методів моніторингу стану об'єктів

Моніторинг – система постійного спостереження за явищами й процесами, що проходять у навколишньому середовищі й суспільстві, результати якого служать для обґрунтування управлінських рішень по забезпеченню безпеки людей та об'єктів економіки [1]. У рамках системи спостереження відбувається оцінка, контроль об'єкта, управління станом об'єкта залежно від впливу певних факторів.

Моніторинг виконується відповідно до ключових елементів конструкції – це фундамент, інженерні споруди. Також проводити моніторинг можна не тільки для елементів, але й для всієї споруди.

Система моніторингу – це багатопараметрична система реального часу з елементами моделювання та прогнозування, що охоплює найбільш відповідальні частини будівельного об'єкта. Система моніторингу повинна стежити як за навантаженнями, діючими на конструкцію, так і за станом матеріалів цієї конструкції – бетону, металу і т. п.

Геодезичний моніторинг (ГМ) представляє собою цілу сукупність процесів, які направлені на контроль і постійне спостереження за станом конструкції, як під час будівництва, так і після введення її в експлуатацію. Основна мета спостереження – це деформаційні процеси об'єкта. Ступінь деформації та інші показники досліджуються шляхом їх вимірювання. Ці вимірювання фіксуються, а потім обробляються й аналізуються [2].

Під час експлуатації інженерних споруд необхідно проводити високоточний моніторинг за їх деформаціями. У процесі дослідження важливим є визначення швидкості та напрямку деформацій для оптимального методу моніторингу.

Для моніторингу за об'єктами чи спорудами використовують наступні методи.

Геометричне нівелювання (ГН). Цей метод широко використовують для визначення осідання споруд, він має високу точність і швидкість вимірювань. Перевищення між точками на відстані 5-10 м можна визначати з точністю до 0,05-0,1 мм, а на відстані сотень метрів – з точністю до 0,5 мм. При визначенні осідання промислових і цивільних будівель використовують нівелювання I і II класів, середня квадратична похибка перевищень на станції в цих випадках 0,4 і 0,9 мм відповідно відмітки деформаційних точок (марок) на весь період спостережень визначають відносно вихідного опорного репера або групи реперів. Отримані результати зрівнюють, оцінюють фактичну точність оцінок, за різницями відміток у циклах будують графіки осідання. У процесі спостережень за спорудами в кожному циклі вимірювань виконується контроль стабільності реперів висотної основи. Для цього всі вони включаються в замкнутий полігон. Такі побудови складають деформаційну мережу першого порядку вимірювання, у ній проводяться вимірювання з максимальною точністю. Для визначення висот деформаційних марок їх включають у нівелірні ходи, які спираються на репери деформаційної мережі першого порядку, ці побудови складають деформаційні мережі другого порядку. У ній вимірювання проводяться з меншою точністю, ніж в мережі першого порядку [2].

Методи визначення горизонтальних зсувів і кренів. Горизонтальні зміщення точок споруди визначають як різницю їх координат, отриманих у різних циклах вимірювань в єдиній системі координат. Для визначення величини зсувів є 2 рішення задачі: по двох координатах або по одній координаті. У першому випадку для визначення координат точок використовують лінійно-кутові побудови, у другому – створні методи.

Лінійно-кутові побудови створюють у вигляді спеціальних мереж триангуляції і трилатерації, ходів полігонометрії, комбінованих мереж, кутових і лінійних зарубок, мереж з витягнутих трикутників із вимірюваними сторонами і висотами, кути вимірюють із високою точністю (0,5-2,0") при коротких сторонах, великій кількості зв'язків. Зрівнювання лінійно-кутових мереж виконують строгим способом, величини зсувів визначають за різницями

координат у різних циклах. При спостереженнях за деформаціями головним є питання надійності їх визначення. Якщо заздалегідь відомо, що спостерігаються значні деформації, їх кількісні характеристики будуть визначені досить надійно. У разі якщо абсолютні значення фіксованих деформацій можна порівняти з помилками їх визначення, надійність визначення деформацій залежить від методу обробки результатів вимірювань.

При визначенні кренів окремих конструктивних елементів, наприклад, колон фундаментів опор мостів, досить часто вдаються до методів, де використовуються кутові вимірювання за допомогою високоточних і точних оптичних теодолітів. До таких методів відносяться спосіб координат (або прямої кутової зарубки), спосіб горизонтальних кутів, спосіб малих кутів [3].

Лазерне сканування (ЛС). Лазерне сканування - це метод, який дозволяє створити цифрову модель навколишнього простору, представивши його набором точок із просторовими координатами. Він має велику швидкість вимірювань, наявність сервоприводу, який автоматично повертає вимірювальну частину приладу як в горизонтальній, так і у вертикальній площинах. Отримана після вимірів модель об'єкта, яка представляє собою гігантський набір точок (від сотень тисяч до декількох мільйонів), що мають координати з точністю в кілька міліметрів [4].

Суть технології лазерного сканування полягає у визначенні просторових координат точок поверхні об'єкту. Це реалізується за допомогою вимірювання відстані до всіх визначених точок за допомогою лазерного безвідбивачевого дальноміра. Прилад, який реалізує на практиці наведену технологію вимірювань, називається лазерним сканером, результатом роботи сканера є безліч точок з обчисленими тривимірними координатами. Такі набори точок прийнято називати хмарами точок або сканами. Зазвичай кількість точок в одній хмарі може варіювати від декількох сотень тисяч до декількох мільйонів. Усе управління роботою приладу здійснюється за допомогою портативного комп'ютера зі спеціальним програмним забезпеченням. Отримані значення координат точок зі сканера передаються в комп'ютер і накопичуються в

спеціальній базі даних. Лазерні наземні сканери часто класифікують за принципом визначення просторових координат на імпульсні, фазові і триангуляційні. В імпульсних сканерах реалізований метод визначення відстані, заснований на точному визначенні часу проходження імпульсу до цілі і назад. Так як у цьому методі використовується світловий імпульс для безпосереднього вимірювання відстані, то головна перевага таких сканерів – у великій дальності вимірювань (декілька сотень метрів). Дальність дії фазових сканерів обмежена 100 м. У сканерах цього типу відстань визначається на основі вимірювання зсуву фаз випромінюваного і відбитого сигналів. Оскільки в цьому методі використовується модульований світловий сигнал, для визначення відстані, на відміну від імпульсного методу, великої потужності лазера не потрібно, тому відстані можуть бути виміряні з помилкою в кілька мм. Швидкість вимірювань фазових сканерів на кілька порядків (1-2) перевершує швидкість імпульсних сканерів. Триангуляційний метод реалізований у високоточних сканерах. Конструктивною особливістю сканерів такого типу є те, що випромінювач і приймач сигналу рознесені на відому відстань (базис). Такі сканери дозволяють досягти точності вимірювань у десяті і навіть соті частки міліметра, але на коротких дистанціях [5].

Моніторинг об'єктів із застосуванням глобальної навігаційної супутникової системи. Глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС) – це система, за допомогою якої можна отримати координати в будь-якій точці земної поверхні шляхом обробки супутникових сигналів. Будь-яка ГНСС складається з трьох сегментів: космічного, наземного і призначеного для користувача. Космічний сегмент представлений сузір'ям супутників, що передають інформацію про своє становище на орбіті; наземний сегмент складається з нерухомих станцій, що забезпечують моніторинг і контроль положення супутників, а також їх технічного стану; призначений для користувача сегмент – це люди різних професій, використовують супутникові приймачі для визначення свого місця розташування на земній поверхні.

Визначення координат за спостереженнями навігаційних супутників можливо наступними методами [6]:

1) абсолютним, коли координати отримують одним приймачем у системі координат штучного супутника Землі (ШСЗ) методом зарубки положення приймача від КА з відомим становищем. Метод також носить назва «точкове позиціонування»;

2) диференціальним, коли спостереження виконуються не менше, ніж двома приймачами, один із яких розташований на опорному пункті з відомими координатами, а другий – на визначеному. У цьому методі за результатами спостережень на опорному пункті отримують поправки до параметрів спостережень для визначеного пункту або за його координатами, тобто спостереження обробляються окремо, метод забезпечує рішення в реальному часі;

3) відносним, коли одночасно виконані на опорному і визначеному пунктах спостереження обробляються спільно. У цьому методі визначають вектор, що з'єднує опорний і визначений пункти, або так званий «вектор базової лінії». У кожному із зазначених методів визначення координат можливо шляхом вимірювання як за фазою коду, так і за фазою несучої частоти сигналу (зазвичай просто за фазою несучої). Точність кодової діяльності має метровий рівень, точність фазових вимірів становить кілька мм. Точність диференційного і відносного методів вище, ніж у абсолютного (помилки на рівні см і менше). У кожному з методів спостереження можуть бути виконані в режимах статички і кінематики. У першому випадку обидва приймачі стаціонарні, у другому – один приймач нерухомий, а інший переміщається. Статична позиціонування дозволяє підвищити точність визначень за рахунок накопичення даних. Відносне позиціонування за фазовим вимірюванням є найбільш точним методом визначення координат і використовується в геодезії найбільш часто. Кінематичне позиціонування дає можливість отримувати траєкторію руху об'єкта, на якому встановлений рухливий приймач – ровер [7].

За рівнем охоплення території розрізняють глобальний, регіональний і локальний моніторинг, за оперативністю отримання результату – від часток секунди до декількох годин і навіть діб і більше. Моніторинг об'єктів, очевидно, можна розділити на дві категорії: моніторинг станів (наприклад, деформацій) і моніторинг положень [8].

Моніторинг деформацій інженерних споруд (мостів, веж, труб і т.д.) із застосуванням супутникових технологій стає звичайним явищем. Головна перевага моніторингу із застосуванням ГНСС складається в його безперервному характері, що можливо і в реальному масштабі часу, і з після обробкою. Це особливо важливо, коли альтернативою є виконання робіт класичними геодезичними методами, що проводяться з інтервалом у рік, півроку або щомісяця. Коли проводиться довгостроковий і безперервний моніторинг деформацій споруд із застосуванням ГНСС, добові або сезонні ефекти легко виявляються як фоновий шум у числових діаграмах, таблицях і графіках, які відображаються системою. Істинний рух розрізняється як відступ від цього фонового шуму. Дуже важливим вважається темп запису даних. Для будівель темп спостережень повинен бути дуже високим (до 20 Герц), але для гребель він може бути набагато нижче (5 хвилин). Високі частоти краще підходять для захоплення початку динамічних деформацій у спорудах типу високих будівель і мостів із довгими прольотами при їх тривалому моніторингу, у той час як низькі частоти краще підходять для повільної або імпульсивної деформації споруд, типу дамб із земляним заповненням і зсувних явищ [9].

1.2. Класифікація деформацій

Деформація – це зміна розміру і форми об'єкта. Причиною деформації є те, що різні частини об'єкта здійснюють різні переміщення під час впливу об'єктів зовнішніх сил. Еластичні деформації – це ті, які повністю зникають після прикладеної сили. Пластичні, які не зникають після прикладеної сили. На рисунку 1.1 показані види деформацій.

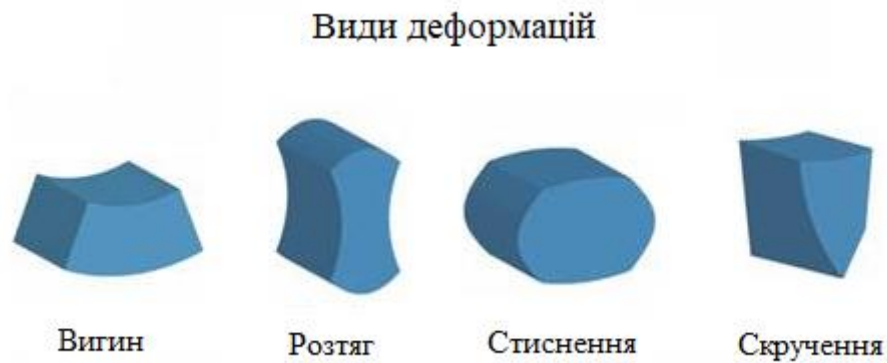


Рис.1.1 Види деформацій

Під пружними деформаціями розуміється зміна відстані між частинками об'єкта. У недеформованому об'єкті частки знаходяться в певних положеннях рівноваги, у яких сили відштовхування та сили тяжіння, що діють на частини інших часток, рівні. При зміні відстані між частинками одна з цих частинок починає перевищувати іншу. Внаслідок цього виникає різниця цих сил, яка прагне повернути частинку до попереднього положення рівноваги. Еквівалентні сили, що діють на всі частки деформованого об'єкта спостерігаються на практиці силою пружності. Результатом пружної деформації є поява еластичних сил.

При пластичній деформації, як показують спостереження [10], зміщення частинок у об'єкті має зовсім інший характер, ніж при пружному. У випадку пластичної деформації об'єкта відбувається зрушення шарів об'єкта відносно один одного. Це можна побачити за допомогою мікроскопа: гладка поверхня досліджуваного об'єкта стає грубою після пластичної деформації. Похибка відбувається вздовж шарів, у яких знаходяться більшість атомів.

З таким зміщенням частинок об'єкт деформується, але переміщені частинки не діють як "поворотні" сили, тому що кожен атом у своєму новому положенні є таким же, як і до зсуву.

При розрахунку різних приладів чи інших конструкцій, при обробці різних матеріалів важливо знати, як одна або інша частина деформується під дією

навантаження, при яких її деформація не вплине на роботу приладу в цілому, при яких навантаження призводить до руйнування деталей і т.д.

Деформації можуть бути дуже складними. Але їх можна звести до двох типів: розтягування (стиснення) і зрушення.

Деформація розтягування (стиснення). Лінійна деформація виникає, коли сила наноситься вздовж осі стрижня, фіксується з одного кінця. У лінійних деформаціях шари об'єкта залишаються паралельними один до одного, але відстані між ними змінюються. Лінійна деформація характеризується абсолютним і відносним подовженням.

Відносне подовження – це відношення абсолютного подовження до довжини деформованого тіла.

На практиці кабелі для підйомних кранів, канатних доріг, канатів для буксирування піддаються розтягуванню. Стиснуті колони, стіни та фундаменти будівель і т. д.

Деформація переміщення відбувається під дією сил, що застосовуються до двох протилежних граней об'єкта. Ці сили викликають переміщення шарів тіла, паралельних напрямків сил. Відстань між шарами не змінюється. Будь-який прямокутний паралелепіпед, виділений в об'єкт, перетворюється на похилий. Ступінь зсуву деформації – це кут нахилу вертикальних граней.

Деформація зрушення відчувається, наприклад, заклепками та болтами, що з'єднують металеві конструкції. Переміщення при великих кутах призводить до руйнування об'єкта – розрізу.

Деформація вигину характеризується вигином – зміщенням середини променя (або його кінця). При згинанні опуклих частин об'єктів виникає розтягування, а середні частини об'єкта практично не деформуються – нейтральний шар. Наявність середнього шару практично не впливає на опір об'єкта згинання, тому доцільно робити такі частини порожнистими (зберігаючи матеріал і значно зменшуючи їх масу). У сучасній техніці широко використовуються порожнисті балки, трубки.

Деформацію скручення можна спостерігати, коли один кінець стержня закріплений і на нього, діє пара сил, що лежать у площині, перпендикулярній осі стержня. При скрученні окремі шари тіла залишаються паралельними, але повертаються один до одного під певним кутом. Деформації скручення виникають при затягуванні гайок при роботі на валах машин [10].

1.3. Огляд датчиків деформації для систем моніторингу стану об'єктів

1.3.1. Дротовий датчик

Дротяний датчик (ДД) масового застосування (рис.1.2) являє собою плоску петлеподібну дротяну обмотку прямокутної форми (решітку), до кінців якої припаяні або приварені товсті виноски з мідного дроту.

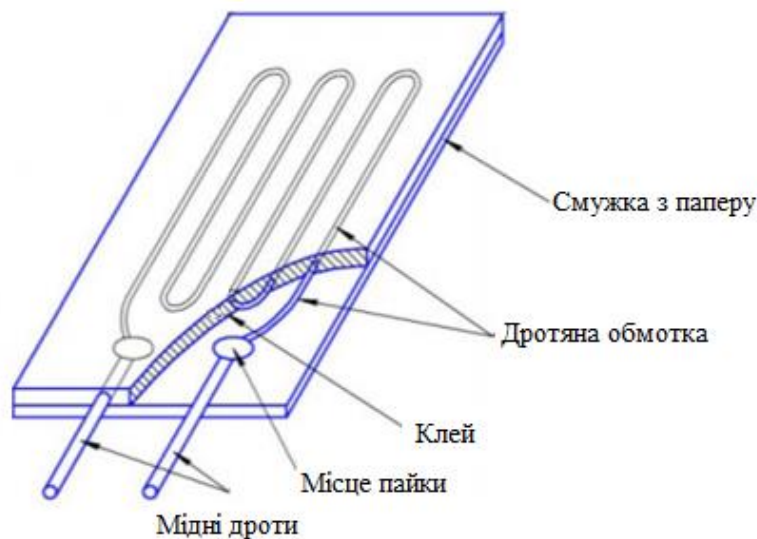


Рис.1.2 Конструкція дротяного тензорезистора [17]

Дротові тензодатчики здатні виміряти навантаження від декількох сотих грама до цілих тонн. Їх називають одноточкові, та як на відміну від плівкових і фольгових моделей, вони вимірюють в одній точці, а не на площині. Така

конструкція дозволяє використовувати дротяні тензодатчики для вимірювання деформації стиску і розтягування [11].

1.3.2. Фольгові датчики

Подальшим розвитком дротяних тензорезисторів з'явилися фольгові тензодатчики (ФД) (рис.1.3).

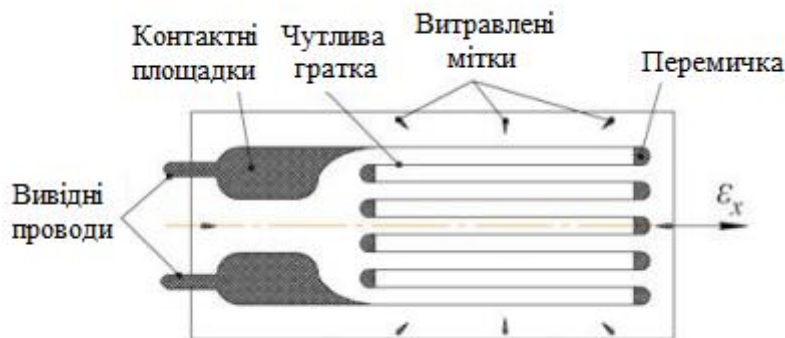


Рис.1.3 Конструкція фольгового тензорезистора [17]

Його використовують як наклеювальний тензодатчик. Це дуже зручна система, яка являє собою фольгову стрічку, товщиною до 12 мкм. Частина плівки має щільну форму, а частина – ґратчасту. Даний тензодатчик відрізняється від інших тим, що до нього можна припаювати додаткові контакти, які нормально переносять низькі температури [11].

1.3.3. Напівпровідникові датчики

Напівпровідникові датчики (НД) були отримані в якості побічного результату досліджень фірми Bell Telephone Laboratories в області напівпровідникових матеріалів і сполук, які згодом привели до створення транзистора.

Дослідження напівпровідникових властивостей кремнію і германію, перші розробки лабораторних датчиків створили основу для промислового

виготовлення напівпровідникових тензодатчиків, що набули поширення в 1960-і роки. Основна перевага цих датчиків – високе значення коефіцієнта чутливості (від 20 до 200) [11].

1.3.4. Високотемпературні датчики

Високотемпературні датчики (ВТД) (рис.1.4) призначені для використання при температурах 400-800 °С, виготовляють у вигляді дротяної ґратки, закріпленої за допомогою спеціального жароміцного цементу в трубці на фользі з нержавіючої сталі.[11]

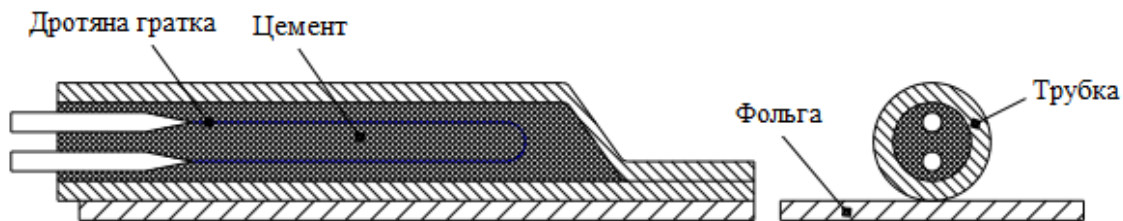


Рис.1.4 Високотемпературний тензодатчик [17]

1.3.5. Волоконно-оптичні датчики

Волоконно-оптичні датчики (ВОД) можна умовно розділити на три типи: точкові, розподілені і квазірозподілені. Точкові дозволяють проводити вимірювання і контролювати параметром у певній точці об'єкта, як і більшість інших типів неволоконних датчиків. Як правило, такі датчики мають малий розмір і високу точність вимірювання. Вони можуть бути використані в якості локальних термометрів, тензодатчиків, датчиків тиску, акселерометрів і т. д. Залежно від типу сенсорного елемента локалізація датчиків може досягати 0.1 см^2 . Як у випадку брегівського чутливого елемента.

Безперечною перевагою розподілених датчиків є можливість здійснення безупинного контролю параметрів по довжині (об'ємом) об'єкта в будь-якій його точці, де встановлено сенсорний світловод. Принцип дії таких сенсорних систем,

заснований на аналізі зміни параметрів по довжині світловода і на нелінійних ефектах. Недоліком розподілу вимірюваного параметра по довжині є відносно невисока точність визначення локалізації обурення (кілька метрів по довжині) і відносно невисока точність вимірювання величини. Розподілені сенсорні системи можуть бути використані для контролю великих територій в якості датчиків радіації і температури, дозволяють аналізувати градієнти температур на великих об'єктах, котлах тощо.

Система на квазірозподілених датчиках об'єднує переваги перших двох схем. Квазірозподілений датчик являє собою масив точкових сенсорних елементів, як правило, на основі волоконних решіток, об'єднаних одним загальним світловодом. Кожен елемент має свої унікальні характеристики, що дозволяє проаналізувати його стан незалежно від інших сенсорних елементів.

Точність таких систем визначається точністю окремих датчиків, а масив може об'єднувати до 100 і більше елементів. Сенсорні масиви дозволяють проводити моніторинг складних об'єктів, інженерних споруд, мостів, тунелів, корпусів кораблів і літальних апаратів, нафтових свердловин і т.п., аналізувати градієнт розподілу температури, навантажень, тиску, контролювати до 100 і більше точкових об'єктів. Причому для цього використовується тільки один волоконний світловод і аналізатор. Саме квазірозподілені системи порівняно з електричними аналогами мають малу вагу і розмір, що особливо важливо для авіації і космонавтики.

Таким чином, волоконно-оптичні системи можуть із успіхом застосовуватися для контролю деформацій, температури, механічної напруги, тиску [12].

1.3.6. Датчики на основі волоконних брегівських решіток

Одним із найбільш часто використовуваних і широко відомих оптичних датчиків є датчики на основі волоконних брегівських решіток (ВБР), які відображають довжину хвилі світла, яка змінюється в залежності від змін

температури або деформації. ВБР створюються з використанням голографічної інтерференції або фазової маски для експонування короткої довжини світлочутливого волокна в періодичний розподіл інтенсивності світла.

Показник заломлення волокна постійно змінюється в залежності від інтенсивності світла, на який він піддається. Отримана періодична зміна показника заломлення називається волокнистістю брегівської решітки.

Коли промінь світла широкого спектру надсилається в ВБР, він відбивається від кожного сегмента змінного показника заломлення, який конструктивно зустрічається тільки для певної довжини хвилі світла, званої довжиною хвилі Брега. Це ефективно змушує ВБР відображати певну частоту світла при передачі всіх інших.

Робота оптичного датчика на ВБР показана на рис.1.5 [18].

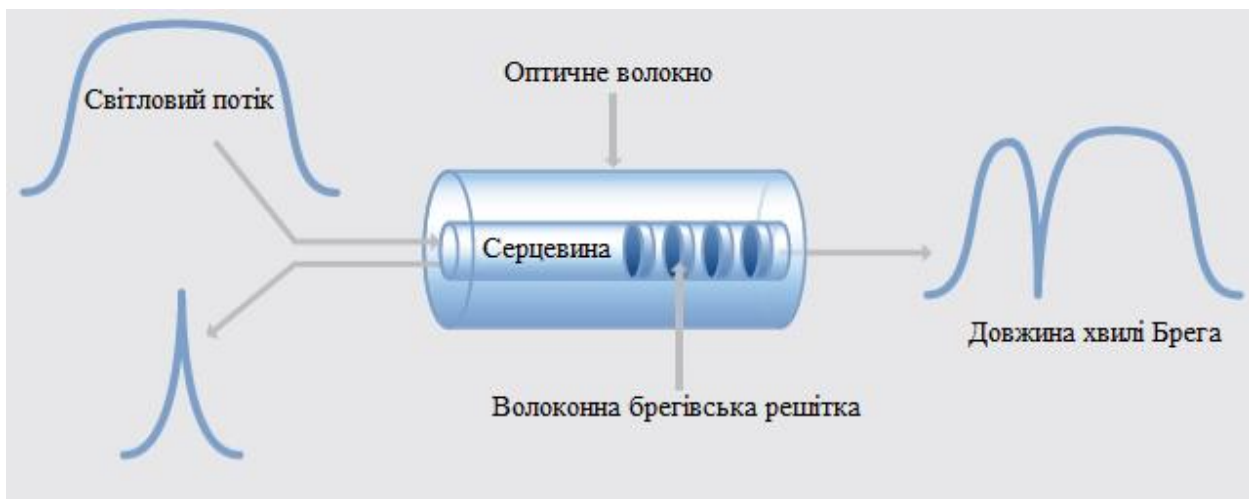


Рис.1.5 Робота оптичного датчика на ВБР

Оскільки довжина хвилі Брега є функцією відстані між решітками, ВБР можуть бути виготовлені з різними довжинами хвиль Брега, що дозволяє різним ВБР відображати унікальні довжини світла. Детальний вигляд ВБР показано на рис.1.6 [18].

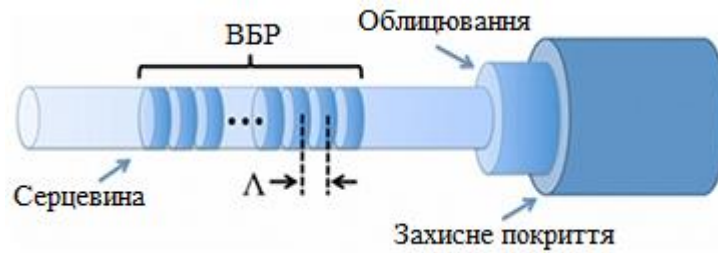


Рис.1.6 Детальний вигляд ВБР

Зміни напруги та температури впливають як на ефективний показник заломлення n , так і на решітчастий період Λ ВБР, що приводить до зсуву відбитої довжини хвилі. Зміна довжини хвилі ВБР через напругу та температуру може бути приблизно описана рівнянням (1.1) [18]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p_e) \cdot \varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

де $\Delta\lambda$ – зсув довжини хвилі, λ_0 – початкова довжина хвилі.

Рівняння (1.1) описує вплив температури на зміну довжини хвилі, де α_Λ – коефіцієнт теплового розширення, а α_n – термо-оптичний коефіцієнт, α_n описує зміну показника заломлення, а α_Λ описує розширення решітки через температуру.

В якості чутливого елемента волоконно-оптичних датчиків виступає волоконна брегівська решітка, яка здатна як відображати, так і пропускати певні довжини хвиль світла. Цей ефект досягається шляхом створення періодичної зміни показника заломлення в сердечнику волокна.

При проходженні лазерного випромінювання через волокно частина його на певному протяжному напрямку відбивається від решітки. Цей пік відображеного випромінювання реєструється вимірювальною апаратурою. У результаті дії багатьох фізичних параметрів змінюється інтервал між вузлами решітки Брегга, а також коефіцієнт заломлення волокна. Відповідно, змінюється

довжина хвиль випромінювання, відбитих від решітки. За зміною довжини хвилі можна визначити точні характеристики змін [18].

Кожний осередок брегівської решітки відображає малу частину випромінювання, що пропускається через оптоволокно. Для довжини хвилі, у 2 рази більше, ніж період решітки, відображені промені складаються по фазі. У результаті отримується відбитий світовий сигнал із обмеженою спекτροвою стрічкою. Відображена решіткою довжина хвилі називається брегівською. Брегівська хвиля залежить від температури та натягу волокна.

При впливі на оптичне волокно (температура, тиск і ін.) показник заломлення і відстань між осередками решітки змінюються і від неї відображаються хвилі іншої довжини. За зміною відображеної довжини хвилі визначаються необхідні характеристики (температура, тиск, деформація та ін.).

В оптоволоконних датчиках на основі брегівських решіток вимірювана величина перетворюється в відхилення брегівської довжини хвилі. Система реєстрації перетворює зміщення довжини хвилі в електричний сигнал.

Чутливий елемент такого датчика не містить електронних компонентів, і тому він є повністю пасивним, що означає можливість його використання в зоні підвищеної вибухової небезпеки, агресивності, сильних електромагнітних перешкод. На одне волокно може бути встановлено безліч брегівських решіток, кожна з яких дає відповідь на власну довжину хвилі. У цьому випадку замість точкового датчика отримують розподілену реєстраційну систему з мультиплексуванням по довжині хвилі.

Використання довжини хвиль світла в якості інформаційного параметра робить датчик нечутливим до довготривалого дрейфа параметрів джерела та приймача випромінювання, а також до випадкових затухань оптичної потужності у волокні [12].

Переваги волоконно-оптичних ВБР-датчиків [12]:

- широкий діапазон вимірів;
- можливість інтеграції датчика в структуру об'єкта;
- повна пожежо- та вибухобезпечність;

- передача сигналу на далекі відстані;
- інтеграція декількох датчиків в одному оптоволоконному каналі;
- нечутливі до електромагнітних і радіочастотних впливів;
- не вимагають перекалібровки (стійкі в часі при незмінних зовнішніх умовах).

1.3.7. Квазірозподілені і розподільні волоконно-оптичні датчики на брегівських решітках

Створення інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) для контролю деформації до недавнього часу було надмірно дорогим рішенням, у тому числі, і в сенсі витрат на обслуговування і експлуатацію таких систем. Традиційні вимірювальні датчики, що застосовуються в таких ІВС, як правило, вимагають подачі електроживлення і власної лінії передачі сигналу вимірювальної інформації, а також лінії для подачі керуючих сигналів. Крім того, умови експлуатації датчиків досить жорстко обмежені за параметрами навколишнього середовища, згідно з впливом агресивних середовищ, високовольтної напруги і електромагнітних перешкод.

Поява розподілених і квазірозподілених волоконно-оптичних датчиків на основі брегівських решіток докорінно змінило цю ситуацію і зробило можливим створення ІВС для моніторингу об'єктів інфраструктури з прийнятними для практики характеристиками. Цей вид датчиків не вимагає електроживлення, чутлива зона датчика, по суті, поєднана з волоконно-оптичними лініями передачі вимірювальної інформації. Ступінь впливу умов зовнішнього середовища, електромагнітних перешкод, високовольтної напруги, агресивних середовищ на волоконно-оптичні датчики значно нижчий, ніж на датчиках, які використовують електричне перетворення вимірювальної інформації. Крім того, за своїми метрологічними характеристиками волоконно-оптичні датчики перевершують традиційні аналоги, що використовують інші принципи побудови.

Однак при всіх вищеназваних перевагах квазірозподілені інформаційно-вимірювальні системи на основі брегівських решіток поступаються за частотою опитування системам на основі тензодатчиків. У той же час, високі частоти опитування датчиків особливо необхідні для вивчення динаміки розвитку деформації при швидкоплинних процесах з метою оптимізації конструкції об'єкта. Крім того, системи з високими частотами опитування необхідні для вивчення деформацій конструкцій літальних апаратів з метою визначення ресурсу роботи і гранично допустимих навантажень.

Відомо безліч пристроїв на основі квазірозподілених волоконно-оптичних датчиків на брегівських решітках для вимірювання деформацій, і тому доцільно розглянути вимірювальний пристрій на основі квазірозподілених волоконно-оптичних датчиків на брегівських решітках [32].

Принцип роботи такого пристрою заснований на вимірюванні зсуву резонансних довжин хвиль випромінювання, відбитого від набору датчиків Брегга. Тобто кожен датчик Брегга відображає випромінювання у вузькому спектральному діапазоні в околиці резонансної довжини хвилі, значення якої лінійно пов'язано з оптичною довжиною решітки Брегга. Вимірювання спектра проводиться шляхом сканування спектра за допомогою перебудованого фільтра. Один із фотоприймачів реєструє спектр відбитих сигналів від датчиків, а другий канал служить для калібрування сигналу за шкалою довжин хвиль.

Недоліком є те, що у пристрої для забезпечення малої похибки вимірювання резонансних довжин хвиль датчиків у всьому робочому спектральному діапазоні пропонується використовувати всі піки поглинання ціаніду водню, у тому числі, що мають малий контраст, який призводить до зниження потенційного динамічного діапазону системи, а отже, і до зменшення швидкодії, і до зменшення кількості датчиків, які можуть бути використані в пристрої [13].

1.4. Волоконно-оптичні датчики у системах моніторингу

Для моніторингу волоконно-оптична інформаційно-вимірювальна система являє собою найбільш перспективний інструмент для створення систем моніторингу будівельних конструкцій різного призначення.

Волоконно-оптичні датчики температури, тиску, вібрації і деформації об'єктів, протягом останніх кількох років активно розробляються у всьому світі. Про це свідчать численні публікації [14], [15], [16], [19] - [32] у зазначеному напрямку, аналіз яких дозволяє зробити однозначний висновок про важливість і перспективність описуваних волоконно-оптичних систем для практичних застосувань. У багатьох випадках (особливо якщо мова йде про розподілені виміри в умовах підвищеної вибухо- і пожежонебезпеки, про віддалену реєстрацію стаціонарних і динамічних процесів) автори опублікованих робіт відзначають повну відсутність альтернативних способів вимірювання.

Відомо, що в ЄС і США успішно реалізований цілий ряд пілотних проектів по впровадженню та експлуатації волоконно-оптичних систем для контролю стану автомобільних і залізничних мостів, ліній електропередач, для вимірювання розподілу механічних навантажень в конструктивних матеріалах лопастей вертольотів і крил літаків.

Одним із нових і найбільш перспективних варіантів волоконно – оптичних датчиків (ВОД) температури тиску, вібрації і механічних деформацій є датчики з використанням волоконних брегівських решіток у якості чутливого елемента, волоконна решітка представляє собою відрізок волоконного світловода (ВС), у структурі якого наведений додатковий показник заломлення з певним просторовим розподілом. Волоконна брегівська решітка забезпечує вузькосмугове відображення, спектральне положення якого залежить від зовнішніх впливів. Ця властивість брегівських решіток дає можливість застосовувати спектральні методи вимірювання фізичних величин (тиск, температура, зрушення, переміщення, вібрація і т.д.), що дозволяють виключити вплив паразитних змін амплітуди сигналу на точність проведених вимірювань.

Це є суттєвою перевагою таких систем перед системами, що використовують волоконно-оптичні датчики амплітудного типу.

Точність волоконно-оптичних датчиків заснованих на застосуванні волоконних брегівських решіток при вимірюванні температури досягає 0.1°C , а при вимірюванні відносної деформації – 10^{-6} . У даний час розроблені конструктивні рішення, що дозволяють забезпечити поєднання чутливості і динамічного діапазону вимірювань, необхідну для конкретних додатків. Волоконно-оптичні датчики з серією брегівських решіток, записаних в одному волоконному світловоді і мають зміщені відносно один одного резонансні довжини хвиль, у даний час успішно застосовуються цілою низкою західних фірм для квазірозподіленого вимірювання механічних навантажень.

Упроваджуються волоконно-оптичні датчики, які здатні забезпечувати в реальному часі контроль наступних параметрів:

1. Механічних деформацій елементів конструкцій із точністю до сотих часток міліметра, викликаних:

- порушенням геометричних характеристик конструкцій (деформацією, руйнуванням);

- зміною зовнішніх умов (погодні, геологічні, сейсмічні чинники);

- зміною режимів роботи (температури, внутрішнього тиску і т.п.);

2. Температурного розподілу, що характеризує об'єкт з точки зору:

- технологічної безпеки (локальний перегрів);

- пожежної безпеки (перевищення допустимої температури);

- наявності неприпустимих зовнішніх впливів (лісові пожежі, техногенні катастрофи);

3. Аналіз акустичного сигналу, що реєструється високочутливим розподіленим волоконним мікрофонним датчиком, що надає інформацію про типи процесів, що відбуваються в контрольованій зоні за їхніми характерними «звуковими відбитками» - спектрами звукового сигналу, наступних типів:

- механічні дії - свердління, вібрація;

- звукові впливи, ударні хвилі і т.п. .;

- витоку газів і рідин з пробоїн і тріщин;
- нормальний режим роботи агрегатів;

4. Контроль периметра навколо об'єкта, що захищений потайним розподіленим волоконним датчиком, забезпечує:

- виявлення факту порушення периметра;
- ідентифікацію порушника;
- характер діяльності, виробленої порушником в зоні;
- локалізацію місцезнаходження порушника в зоні з точністю до декількох метрів. [13].

1.5. Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто датчики для вимірювання деформації з метою моніторингу та контролю напружено-деформованого стану інженерних конструкцій: дротяні датчики, фольгові датчики, високотемпературні датчики, напівпровідникові датчики, волоконно-оптичні датчики. Серед розглянутих датчиків було обрано волоконно-оптичні датчики для використання їх у системах моніторингу, бо вони мають такі переваги – вибухобезпечність, безіндукційність, еластичність, широкосмуговість, механічна міцність, відсутність взаємної інтерференції, висока електроізоляційна міцність та висока корозійна стійкість, до хімічних розчинників, мастил, води, малі втрати вимірювання, діаметр і маса. А також характеризуються високою точністю вимірювання, підходять для виміру статичних і динамічних напруг, не спотворюючи отримані дані, працюючи навіть в екстремальних умовах, а невеликі розміри дають змогу використовувати датчики практично в будь-яких вимірювальних пристроях, мають низьку собівартість у порівнянні з дорогими аналогами.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД НА ОСНОВІ БРЕГІВСЬКИХ РЕШІТОК

2.1. Основні характеристики волоконно-оптичної брегівської решітки

Волоконна брегівська решітка (ВБР) – ділянка оптичного волокна (ОВ), у серцевині якого показник заломлення (ПЗ) періодично змінюється в поздовжньому напрямку (рис. 2.1) [34].

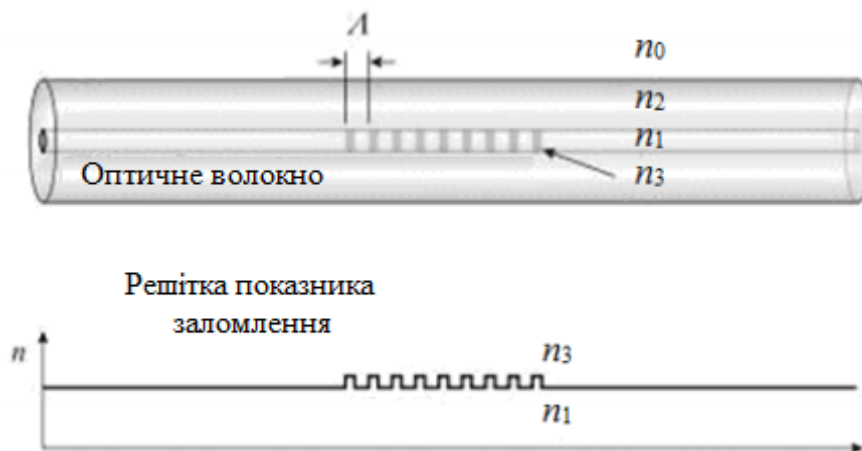


Рис. 2.1. Волоконна брегівська решітка

Випромінювання, що поширюється по ОВ – комбінація власних мод світловоду: направляючих і випромінювальних. Випромінювальні моди ОВ формують безперервну функцію, а направляючі відповідають дискретному набору. При відсутності змін у ПЗ, моди поширюються без взаємодії один із одним. Тому період модуляції ПЗ вибирається таким чином, щоб забезпечити необхідну резонансну взаємодію між обраними модами світловода. Ця модуляція ПЗ пов'язує основну моду ОВ з модою, що розповсюджується у зворотному напрямку. У результаті, на дискретній довжині хвилі випромінювання розповсюджується по ОВ та відбивається від ВБР. Коефіцієнт відображення залежить від глибини модуляції ПЗ, а центральна довжина хвилі відображення визначається умовою Брегга [34]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.1)$$

де λ_B – довжина хвилі брегівського резонансу, n_{eff} – ефективний ПЗ серцевини волокна для центральної довжини хвилі, Λ – період брегівської решітки. Світло, що поширюється в серцевині ОВ, розсіюється кожною гранню решітки ПЗ. Якщо умови Брегга не виконуються, то відбите від кожної грані решітки світло не потрапляє в фазу, у кінці загасає. Для довжин хвиль, які задовольняють умові Брегга, відбите світло від кожної грані решітки ПЗ складається та поширюється по волокну у зворотному напрямку [35].

Розглянемо однорідну решітку Брегга, сформовану в серцевині одномодового ОВ із середнім показником заломлення n_0 . Профіль ПЗ може бути виражений як [34]:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \quad (2.2)$$

де Δn – амплітуда модуляції ПЗ брегівської решітки, Λ – період брегівської решітки, x – відстань уздовж осі волокна. З теорії зв'язаних мод можна визначити функцію спектра відбиття решітки Брегга [34]:

$$R(\lambda, l) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2 sl} \quad (2.3)$$

де $R(\lambda, l)$ – відображення решітки як функції від довжини хвилі λ і довжини решітки l , Ω – коефіцієнт зв'язку, $\Delta k = k - \pi/\lambda$ – хвильовий вектор, де $\Delta k = 2\pi n_0/\lambda$ – це постійна поширення та $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$. Коефіцієнт зв'язку для синусоїдальної функції модуляції ПЗ виражається:

$$\Omega = \frac{n\Delta n\eta(V)}{\lambda} \quad (2.4)$$

де $\eta(V) \approx 1 - 1/V^2$, ($V \geq 2,4$) – функція, яка визначає відсоток інтенсивності основної моди в серцевині волокна. Для брегівської довжини хвилі $\Delta k = 0$, тому вираз набуває вигляду [34]:

$$R(\lambda, l) = \tanh^2(\Omega l) \quad (2.5)$$

Розрахований спектр відображення решітки як функції довжини хвилі показаний на рисунку 2.2 [34].

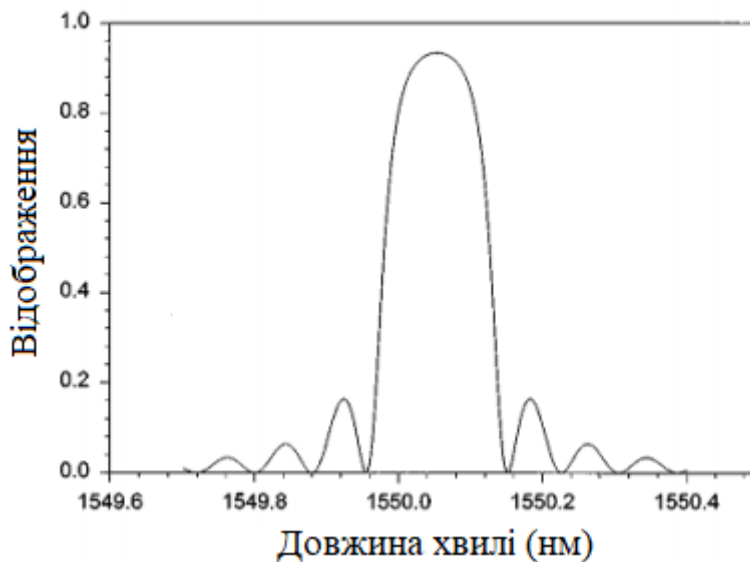


Рис. 2.2 Розрахований спектр відображення ВБР

Коефіцієнт відображення ВБР тим більше, чим більше глибина модуляції ПЗ всередині волоконної решітки Брегга. З виразу (3) видно, що резонансна довжина хвилі ВБР залежить від ефективного ПЗ серцевини світловода та періоду модуляції ПЗ. Одним із найважливіших параметрів ВБР є величина наведеної модуляції ПЗ Δn . Для оцінки амплітуди наведеної модуляції ПЗ слабковідображальної ВБР можна використовувати наступну формулу [34]:

$$\Delta n = \frac{\lambda_B}{\pi \cdot l} \cdot \tanh^{-1}(\sqrt{r_{max}}) \quad (2.6)$$

де r_{max} – коефіцієнт відображення на центральній довжині хвилі брегівського резонансу решітки. Так, наприклад, для ВБР, що має брегівський резонанс на 1550 нм, із коефіцієнтом відображення 10% і довжиною решітки 15 мм, величина наведеної модуляції ПЗ Δn відповідно до формули становить приблизно $1,077 \cdot 10^{-5}$. Основний вираз для розрахунку ширини спектра відбиття ВБР на напіввисоті має вигляд [34]:

$$\Delta \lambda = \lambda_B \cdot \alpha \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2 \cdot n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (2.7)$$

де N – число штрихів решітки. Параметр α приймається рівним 1 для сильновідбивних решіток (ВБР з відображенням близько 100%), у той час як для слабовідбивних решіток $\alpha \approx 0,5$.

2.2. Розробка математичної моделі волоконно-оптичного датчика

Довжина хвилі оптичного випромінювання, що відбите брегівськими решітками, залежить від періоду решітки та ефективного показника заломлення. Зміна механічних напружень та довжини хвилі з урахуванням впливу температури можна визначити за такою формулою [37]:

$$\Delta\lambda_{BP} = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{enn}}{\partial l} + n_{enn} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{enn}}{\partial l} + n_{enn} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta T, \quad (2.8)$$

Λ – період решітки, n_{enn} – ефективний показник заломлення. Перша складова формули (2.8) – зсув довжини хвилі в залежності від деформації, друга – це залежність від температури. Зсув довжини хвилі відбитого випромінювання залежить від деформації, що розраховується за такою формулою [38]:

$$\Delta\lambda_{BP} = \lambda_{BP} \left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \varepsilon_z, \quad (2.9)$$

У цій формулі ν - коефіцієнт Пуассона, а p_{11} і p_{12} – коефіцієнти Поккельса. Для оптичного волокна було обрано наступні коефіцієнти: $n_{enn} = 1.4682$, $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.16$, $\lambda_{BP} = 1500$ нм.

Друга складова визначає залежність зміщення довжини хвилі відносно температури. Довжина хвилі, яка відбивається, від брегівських решіток, суттєво залежить від температури та таких факторів: теплове розширення оптичного волокна, внаслідок зміни механічної довжини решітки та показника заломлення волокна відносно температури. А це значить, що залежність зрушення довжини хвилі відносно температури можна подати такою формулою [38]:

$$\Delta\lambda_{BP} = \lambda_{BP} (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \Delta T, \quad (2.10)$$

де α_n – термооптичний коефіцієнт. α_Λ – температурний коефіцієнт розширення.

Так як для досліджень датчика буде враховуватися перша складова (2.10), а другою, яка залежна від температури, - можна знехтувати. Формула визначення довжини хвилі така [39]:

$$\Delta\lambda_{BP} = \lambda_{BP} \left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \varepsilon_z, \quad (2.11)$$

Якщо діапазон вимірювання деформації $\varepsilon_{z\min} \dots \varepsilon_{z\max}$, мінімальна резонансна довжина хвилі датчика – λ_1 за умови відсутності деформації, число датчиків – N , то необхідний робочий спектральний діапазон знаходимо за наступною формулою [40] :

$$\lambda_n = \lambda_1 \left[1 - \left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \cdot |\varepsilon_{z\min}| \right] \quad (2.12)$$

$$\lambda_6 = \lambda_1 \left[\frac{1 + \left(\left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \cdot \varepsilon_{z\max} \right)}{1 - \left(\left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \cdot |\varepsilon_{z\min}| \right)} \right]^{N-1} \cdot \left[1 + \left(\left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \cdot \varepsilon_{z\max} \right) \right] \quad (2.13)$$

λ_n, λ_6 – нижня та верхня межі робочого спектрального діапазону.

Таким чином, резонансна довжина хвилі кожного наступного датчика знаходиться за формулою:

$$\lambda_i = \lambda_1 \left[\frac{1 + \left(\left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \cdot \varepsilon_{z\max} \right)}{1 - \left(\left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \cdot |\varepsilon_{z\min}| \right)} \right]^{i-1} \quad (2.14)$$

Проміжок довжин хвиль $\Delta\lambda_i$, між датчиками буде таким:

$$\Delta\lambda_i = \lambda_1 \left[\frac{1 + \left(\left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - v(p_{11} + p_{12})] \right) \cdot \varepsilon_{z\max} \right)}{1 - \left(\left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - v(p_{11} + p_{12})] \right) \cdot |\varepsilon_{z\min}| \right)} - 1 \right] \quad (2.15)$$

Наступні формули показують (2.12-2.14), що робочий спектральний діапазон є ширшим, за умови більших діапазонів вимірюваних деформацій та більших резонансів довжини хвиль датчиків на брегівських решітках. Діапазони деформацій залежать від умов експлуатації, тому вважаємо їх незмінними. Брегівську довжину хвилі змінюємо в обмеженому спектральному діапазоні. Найменша резонансна довжина хвилі датчиків більша від довжини хвилі зрізу. За умови, якщо брегівська решітка виконана в стандартному, телекомунікаційному волокні, то нижню межу спектрального діапазону можна визначити за формулою:

$$\lambda_n = \lambda \cdot 0.83 \cdot \pi \cdot d_{сер} \cdot \left(n_{сер}^2 - n_{об}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.16)$$

$d_{сер}$ – діаметр серцевини оптоволокна, $n_{сер}$ – коефіцієнт заломлення серцевини оптоволокна, $n_{об}$ – коефіцієнт заломлення оболонки. Довжина хвилі зрізу для телекомунікаційного волокна – 1255-1260 нм. Проте, визначаючи нижню межу робочого спектрального діапазону, враховуємо згасання в області довжини хвилі зрізу, яке в 2 рази вище, від згасання в області довжини хвилі 1550 нм.

2.3. Методика побудови інформаційно-вимірювальної системи на основі брегівських датчиків

Існує безліч різних способів побудови сенсорних систем на основі брегівських решіток. У найпростішому випадку сенсорна система є точковим датчиком, з'єднаним через оптичний розгалужувач з джерелом світлового

сигналу і блоком аналізатора (рис. 2.3). Сигнал від джерела відбивається чутливим елементом. Довжина хвилі відображення фіксується блоком аналізатора [36].

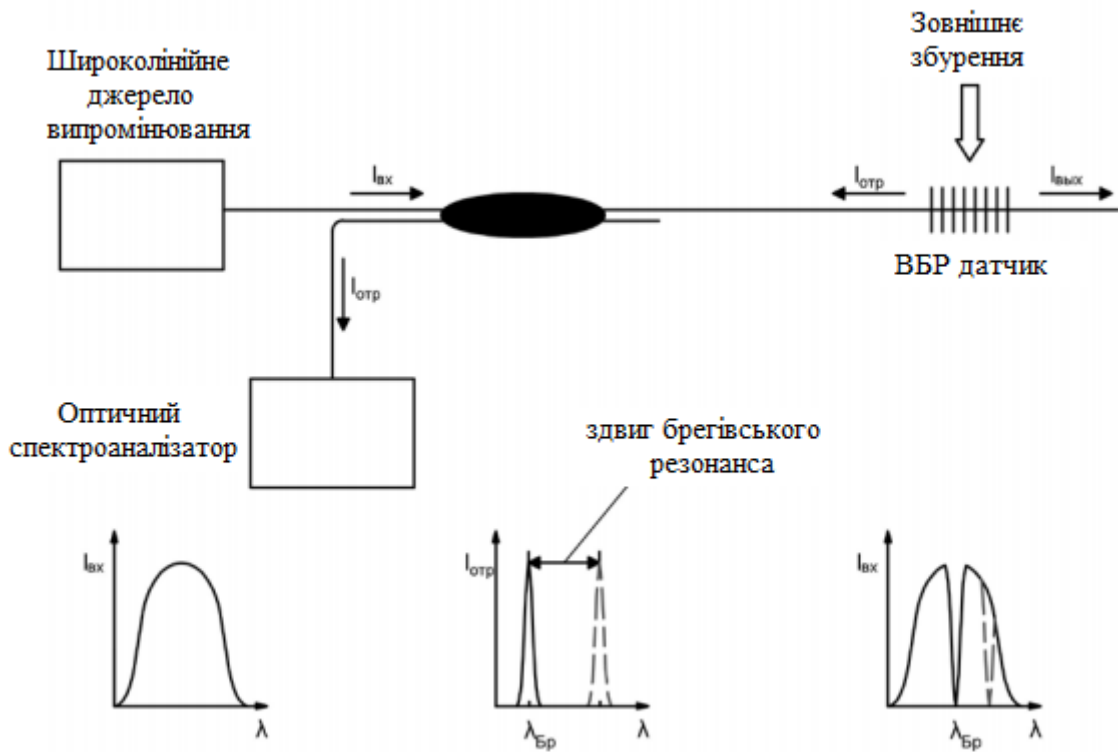


Рис. 2.3 Схема волоконно-оптичної системи на брегівських решітках

Як правило, аналізатори – вузькосмугові спектрометри. Вони є різних типів: від стандартних дифракційних, де в якості дисперсійного елемента використовується дифракційна решітка, до аналізаторів на основі інтерферометра Фабрі-Перо. Одним із переваг волоконно-оптичних датчиків є їх відносно легка можливість об'єднання в масиви (мультиплексування). Найбільш часто в волоконних датчиках на брегівських решітках використовуються два види мультиплексування – мультиплексування по довжині хвилі (Wavelength Division Multiplexing – WDM) і мультиплексування за часом (Time Division Multiplexing – TDM).

Мультиплексування за часом TDM засноване на аналізі швидкості проходження сигналу по системі. Кожен датчик розділений ділянкою волоконного світловода, для проходження якого сигналу потрібний певний і

відомий заздалегідь час. Джерело посилає короткий імпульс у систему. Сигнал на виході – ряд імпульсів, диференційованих за часом, кожен із яких несе інформацію про стан кожного сенсора окремо. У чистому вигляді така система мультиплексування зрідка використовується для об'єднання берегівських волоконних датчиків, проте як складова частина більш складної системи зустрічається досить часто. Детальний опис даного типу мультиплексування представлено в роботі [36].

Принцип WDM мультиплексування ґрунтується на тому, що кожен сенсорний елемент записується зі своїм унікальним періодом решітки, що дозволяє розрізнити їх по спектру при аналізі і, відповідно, фіксувати показання кожного сенсора окремо. Кількість сенсорів у масиві, в основному, обмежується спектральною шириною джерела і динамічним діапазоном аналізатора.

2.4. Аналіз існуючих методів для побудови волоконно-оптичних систем на основі берегівських датчиків

Провівши аналіз датчиків деформації, можемо перейти до реалізації системи вимірювання, котра призначена для прийому та обробки отриманих оптичних сигналів з датчиків, що містять дані про зняті параметри. Головним параметром оптичних сигналів, відбитих від датчиків випромінювання, є довжина хвилі. Щодо вимірювання довжини хвилі створюємо систему вимірювання, структуру якої представляємо на рис. 2.4. [37]

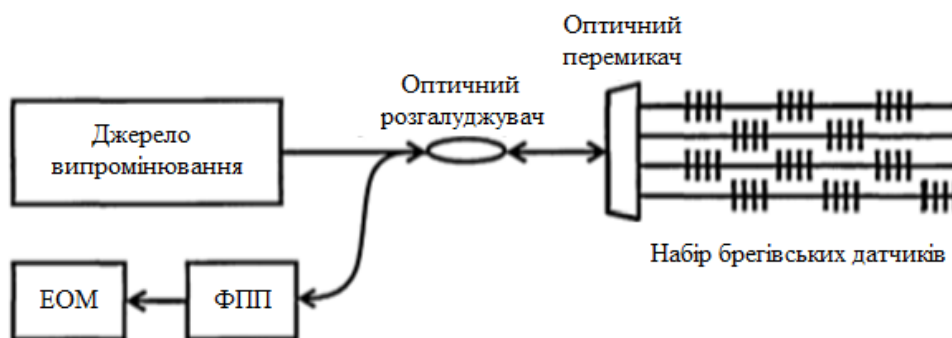


Рис. 2.4. Узагальнена структурна схема системи вимірювання

Система вимірювання має наступні складові: джерело випромінювання, оптичний розгалужувач, система оптичних перемикачів, брегівський датчик, фотоприймальний пристрій і електронно-обчислювальна машина. На вході оптичного розгалужувача, від джерела надходить випромінювання, що здійснюється оптичним перемикачем і подається до вимірювального каналу й послідовно проходить через набір волоконних брегівських датчиків з хвилі, що має різну резонансну довжину. Відбитий від набору волоконно-оптичних решіток сигнал реєструється на фотоприймальному пристрої, і на підставі зсуву резонансних довжин хвиль робимо висновок про деформацію брегівських решіток.

Процедура, що визначає технічні характеристики системи вимірювання – моніторинг волоконних брегівських датчиків, що здійснюється різними методиками. Методи для моніторингу датчиків деформації наведено в таблиці 2.1 [38].

Таблиця 2.1. Основні методи опитування брегівських датчиків

Метод	Метод, оснований на використанні щілинного фільтра	Метод, опитування на основі перебудовуючого фільтра	Інтерферометричний метод	Метод, опитування на основі перебудовуючого лазера	Метод, опитування на основі спектродетектора
Діапазон роздільної здатності	10^2-10^3	10^3-10^4	10^3-10^4	10^3-10^4	10^3-10^4
Частота вимірювання, Гц	200	500	500	50	50000

Довготривала стабільність	Потрібна стабілізація фільтру		Потрібна опорна решітка для компенсації зсуву	Добра	Добра
Сумісність зі спектральним потовщенням	Низька	Висока			
Потенційна вартість	Низька	Середня	Низька	Висока	Середня

Наведена узагальнена схема та запропонована класифікація методів моніторингу волоконних берегівських датчиків дає можливість поділити існуючі методи побудови волоконно-оптичних систем вимірювання деформації на:

- 1) сканування спектра вузькосмуговим джерелом випромінювання і прийом широкосмуговим приймачем;
- 2) використання широкосмугового джерела, в якому по спектру здійснюється сканування вузькосмуговим приймачем;
- 3) використання широкосмугового джерела і приймача випромінювання без використання перебудовуючих і фільтруючих елементів.

У кожній із вищезазначених груп методів необхідно провести аналіз схем побудови системи вимірювання, оцінити її основні технічні та метрологічні характеристики, в тому числі і параметр швидкодії.

2.4.1. Побудова волоконно-оптичної системи з використанням перебудовуючих по довжині хвилі джерел випромінювання

Для моніторингу берегівських датчиків, як джерела випромінювання, було взято лазерне джерело, яке перебудовується за сигналом із електронно-

обчислювальної машини. У кожен момент часу спостерігаємо довжину хвилі сигналу, потім фіксуємо інтенсивність відбитого сигналу у каналах при кожному значенні довжини хвилі. Використовуємо однобазовий фотоприймальний пристрій, наведений на схемі [39]. ФПП 1 усуває похибку, що виникає за умови нестабільності інтенсивності джерела випромінювання. ФПП 2 потрібен для зняття інтенсивності сигналів, відбитих від датчиків.

Перебудовуючий лазер може використовуватися одночастотний перебудовуючий ербієвий волоконний лазер. За допомогою п'єзоприводу керованого електронно-обчислювальною машиною здійснюється зміна довжини резонатора, яка призводить до перебудовування довжини хвилі. Основною перевагою такої схеми є відсутність фільтруючих компонентів. До недоліків належать: похибка п'єзоприводу та обмеження діапазону перебудовуючого лазера.

Використання перебудовуючого лазера дозволяє проводити перебудову в діапазоні 1536 - 1544 нм. В якості джерел для моніторингу брегівських датчиків використовуються напівпровідникові лазери. Оскільки вони володіють: широким діапазоном перебудовування, низьким енергоспоживанням, високою стабільністю, великим ресурсом роботи [40].

2.4.2. Побудова волоконно-оптичної системи із використанням широкосмугових джерел випромінювання

Вимірюючи одночасно сигнал із усіх датчиків в одному каналі, застосовується широкосмугове джерело випромінювання. Група даних методів моніторингу сприяє високій швидкодії, проте вони обмежують динаміку діапазону, оскільки широкосмугові джерела випромінювання характеризуються спектральною щільністю енергії, яка є нижчою, ніж у перебудовуючих лазерах. У якості спектроаналізатора використовуються різні спектральні фільтри, що діють спільно із приймачем випромінювання: широкосмуговий (щілинний) фільтр, монохроматор, скануючий інтерферометр Фабрі-Перо. Розглянемо

вимірювальні схеми. У таблиці 2.2. наведено основні параметри систем вимірювання, які побудовані на основі застосування широкосмугових джерел та різних перебудовуючих елементів [39].

Таблиця 2.2. Параметри основних методів побудови систем вимірювання, що використовують широкосмугове джерело випромінювання.

Параметр	Метод побудови вимірювання		
	Широкосмуговий (щілинний) фільтр	Монохроматор	Скануючий інтерферометр Фабрі-Перо
Швидкодія, мс	1	2,5	0,8
Частота опитування, Гц	10	200	200

2.4.3. Побудова волоконно-оптичної системи за допомогою широкосмугового джерела та приймача випромінювання

Перспективними схемами щодо побудови вимірювальних систем із точки зору їхньої швидкодії є схеми з одночасною реєстрацією повного спектру випромінювання, відбитого від брегівських датчиків. Одним із таких рішень є схема з використанням поліхроматору, типовий пристрій рис. 2.5 [40].

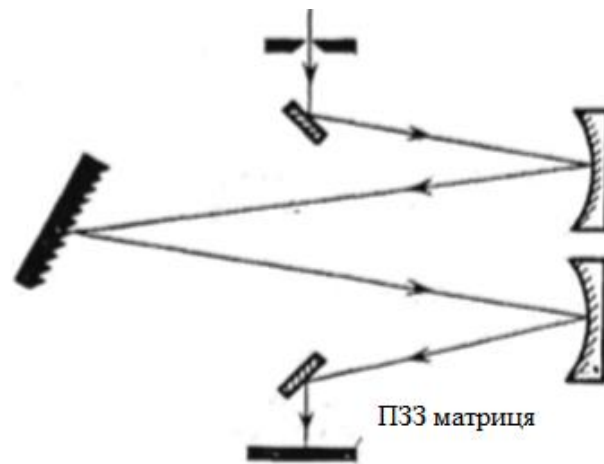


Рис. 2.5. Структурна схема з використанням поліхроматору

У даних приладах випромінювання, що мають різну довжину хвилі, відбивається сигнал від дифракційної решітки під різними кутами. Потім випромінювання фокусується на ПЗЗ-матриці. Унаслідок, кожен піксель ПЗЗ-матриці реєструє свою область спектра. За цим методом спектр реєструється псевдодискретно. Кожен елемент багатоелементного ФПП інтегрує значення спектральної залежності коефіцієнта відбиття в ширшому спектральному діапазоні порівняно з аналогічним дослідженням спектра відбиття за допомогою перебудовуючого лазера. Це пояснюється тим, що ширина лінії генерації сучасних перебудовуючих лазерів складає 0,03... 0,1 пм, а межа розширення крапкових зразків дифракційних спектрометрів складає 20 ... 100 пм. Похибка близько 1 пм і межа розширення на рівні 0,1 пм досягається за рахунок спеціальних алгоритмів обробки сигналів, що надійшли на приймач, наприклад, часто застосовується п'ятикрапковий алгоритм пошуку максимумів брегівських довжин хвиль.

Аналізуючи системи швидкодії, можна зробити висновок, що метод володіє потенційно високою швидкістю, обмежений шумами багатоелементного фотоприймального пристрою. Оцінку граничної частоти опитування брегівських датчиків можна визначити за формулою [40]:

$$f_k = \left(\frac{P_{дж} k}{N_{пкс} P_{шум}} \right)^2, \quad (2.21)$$

$P_{дж}$ – потужність джерела, k – коефіцієнт, що характеризує втрати потужності в системі, $N_{пкс}$ – число пікселів багатоелементного приймача, $P_{шум}$ – потужність, еквівалентна шуму, наведена до смуги частот.

В отриманій оцінці потенційної швидкодії не зазначено низку факторів, які пов'язані з шумами підсилювачів, методи зчитування сигналу з багатоелементного приймача, наявність у багатоканальній системі оптичного перемикача. Врахування вищезазначених факторів сприятиме зменшенню граничної частоти опитування берегівських датчиків, проте отримана оцінка дає уявлення про потенційну швидкодію.

У даний час застосовуються багатоелементні ФПП із InGaAs-структур для спектрального діапазону від 900 до 2000 нм. Використання під час проектування вимірювальної системи лінійки фотодіодів для зчитування спектра випромінювання, відбитого від берегівських датчиків, у широкому спектральному діапазоні дозволить збільшити кількість датчиків, що розміщуються в системі.

Отже, для розглянутого методу побудови вимірювальних систем можна відзначити такі переваги:

- 1) висока частота вимірювань (до 6 кГц);
- 2) широкий робочий спектральний діапазон, який визначається типом і кількістю використовуваних джерел – суперлюмінесцентних діодів (до 60 нм).

Таким чином, даний метод раціонально використовувати для завдань, у яких відстежуються зміни деформацій із високою частотою вимірювань [40].

2.5. Висновок до розділу

У цьому розділі було розглянуто характеристики волоконно-оптичного датчика, розроблено математичну модель волоконно-оптичного датчика, розглянуто методику побудови інформаційно-вимірювальних систем з використанням волоконних брегівських решіток, що дає можливість побудувати найпростішу сенсорну систему на сучасних методах опитування волоконно-оптичних систем та побудови волоконно-оптичних систем з використанням волоконних брегівських решіток.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ВОД НА ОСНОВІ БРЕГІВСЬКИХ РЕШТОК

Моделювання – один із основних методів пізнання, що є формою відображення дійсності і полягає в відтворенні тих чи інших властивостей реальних об'єктів, предметів і явищ за допомогою інших об'єктів, процесів, явищ, або за допомогою абстрактного опису у вигляді зображення, плану, карти, сукупності рівнянь, алгоритмів і програм.

Можливості моделювання – це висвітлення результатів, отриманих у ході дослідження моделі, засновані на тому, що модель у певному сенсі відтворює цікаві для дослідника властивості об'єкта. Моделювання як форма відображення дійсності широко поширена і має повну класифікацію. Широко використовується не тільки в науці і техніці, але в мистецтві і в повсякденному житті. Розрізняють такі види моделювання:

- концептуальне моделювання – сукупність уже відомих фактів або подань відносно досліджуваного об'єкта або системи, що роз'яснюється за допомогою спеціальних знаків, символів, операцій над ними;

- фізичне моделювання – модель і змодельований об'єкт сприймаються як реальні об'єкти або процеси єдиної або різної фізичної природи, причому між процесами в об'єкті-оригіналі і в моделі виконуються деякі співвідношення подібності, що впливають з схожості фізичних явищ;

- структурно-функціональне моделювання, при якому моделями є схеми (блок-схеми), графіки, креслення, діаграми, таблиці, малюнки, доповнені спеціальними правилами їх об'єднання і перетворення;

- математичне (логіко-математичне) моделювання, при якому моделювання, включаючи побудову моделі, здійснюється засобами математики і логіки;

- імітаційне (комп'ютерне) моделювання, при якому логіко-математична модель досліджуваного об'єкта є алгоритм функціонування об'єкта, реалізований у вигляді програмного комплексу для комп'ютера [41].

Для проведення досліджень – моделювання процесу деформації волоконно-оптичного датчика на основі решіток Брегга було обрано MatLab так як в ньому зручно проводити моделювання.

За допомогою моделювання було реалізовано принцип роботи волоконно-оптичного датчика. Сигнал подається на волоконно-оптичний брегівський датчик з такою спектральною характеристикою (рис.3.1).

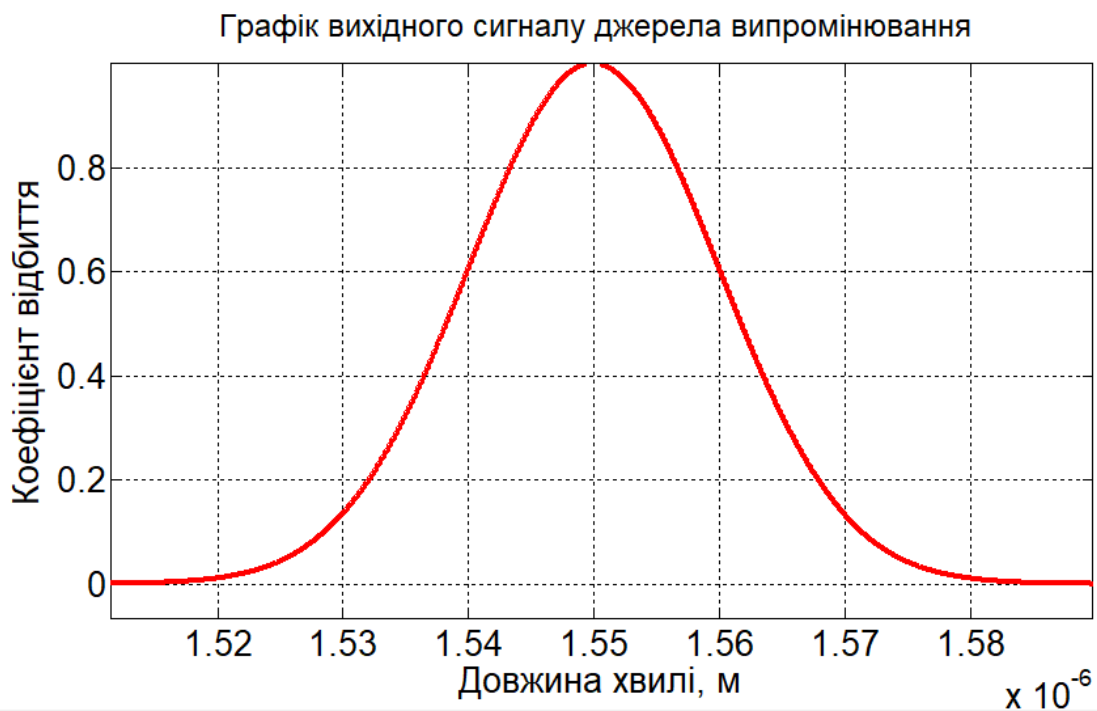


Рис. 3.1. Графік вихідного сигналу випромінювача

3.1. Моделювання процесу роботи ВОД на основі брегівських решіток без впливу деформації

Сигнал, який подається через волоконно-оптичний датчик буде пропускатися не повністю, частина сигналу буде відбиватися та фіксуватися дитектором (рис. 3.2).

Графік сигналу зафіксованого детектором

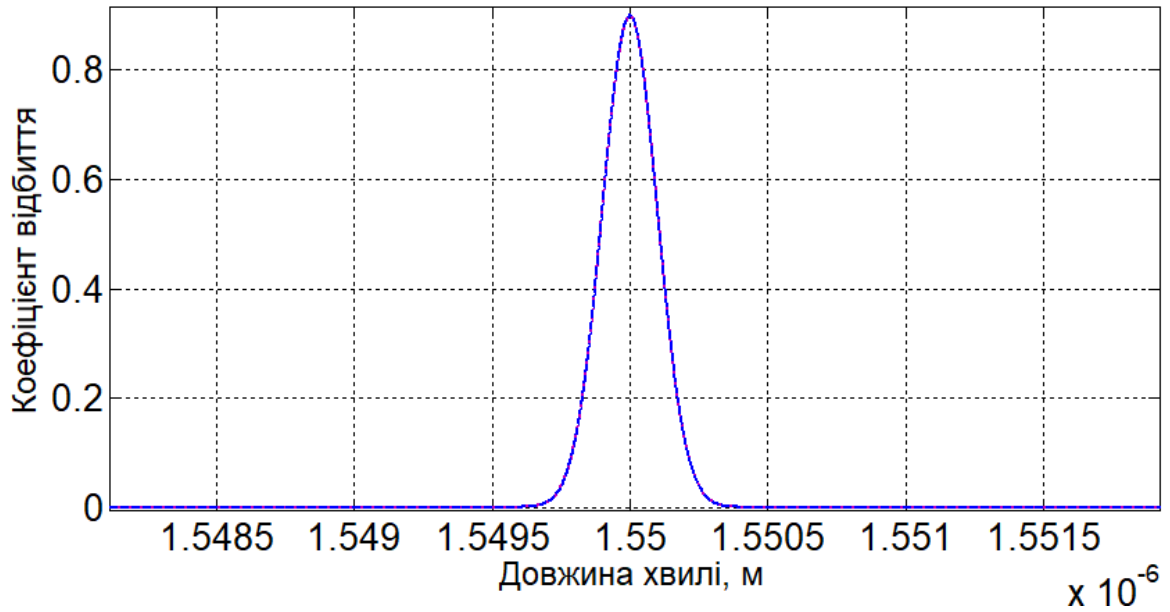


Рис. 3.2 Сигнал зафіксований дитектором

Вихідний сигнал, який пройшов через волоконну брегівську решітку характеризує різницю сигналів вхідного спектру, який зображений (рис.3.1) та відбитого спектру, який представлений (рис.3.2). Графік вихідного спектру зображений (рис.3.3).

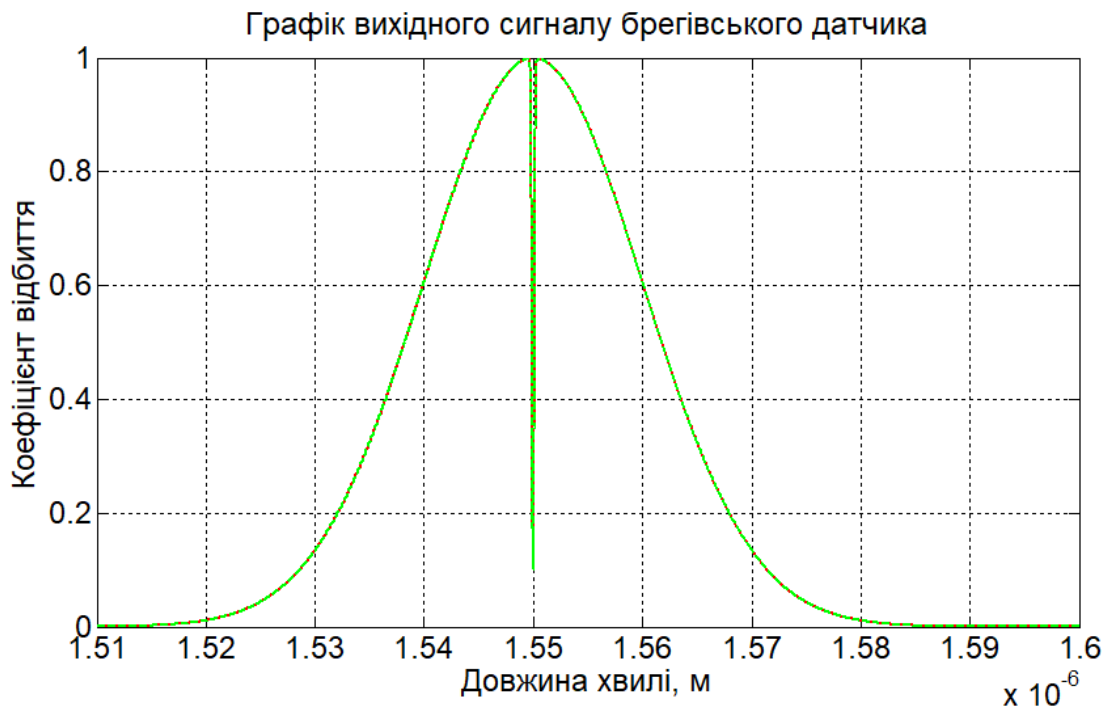


Рис.3.3. Графік вихідного спектру ВОД

3.2. Моделювання процесу роботи ВОД на основі брегівських решіток з впливом деформації

Для дослідження характеристик датчика задаємо наступну деформацію $25 \cdot 10^{-4}$. Сигнал подається на волоконно-оптичний брегівський датчик з такою ж спектральною характеристикою (рис.3.4).

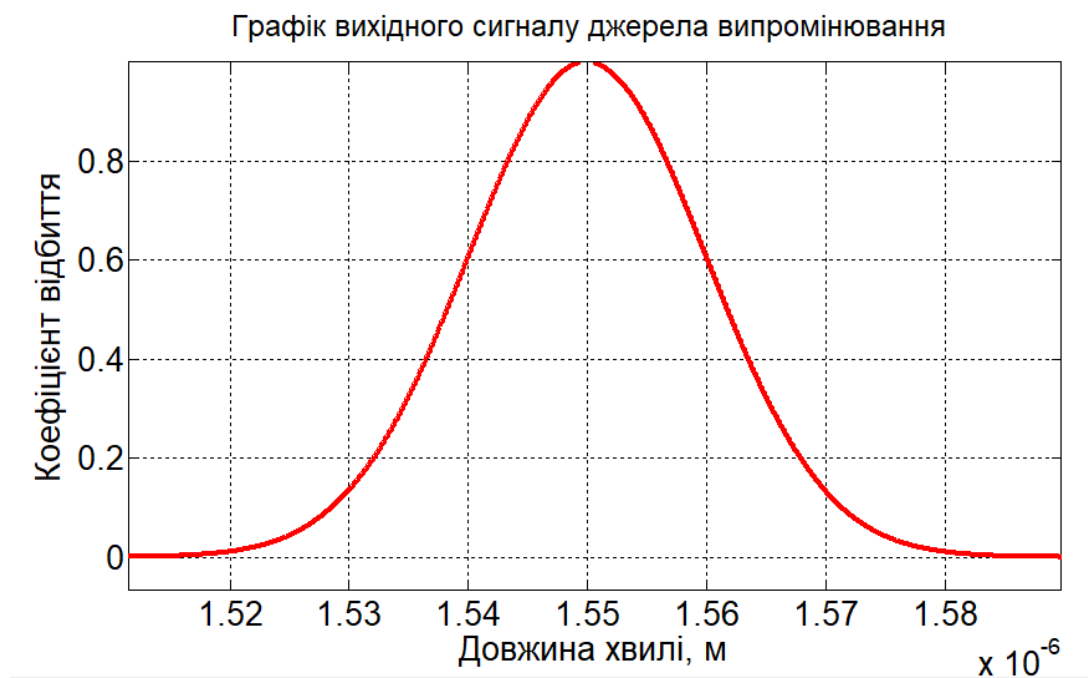


Рис. 3.4. Графік вихідного сигналу випромінювача

Сигнал, який подається через волоконно-оптичний датчик буде пропускатися не повністю, частина сигналу буде відбиватися та фіксуватися дитектором. Коли відбувається деформація, то пік відбитого сигналу зміщується відносно початкового значення. Величина зміщення характеризується зсувом по довжині хвилі λ . Відбита частина сигналу (рис.3.5).

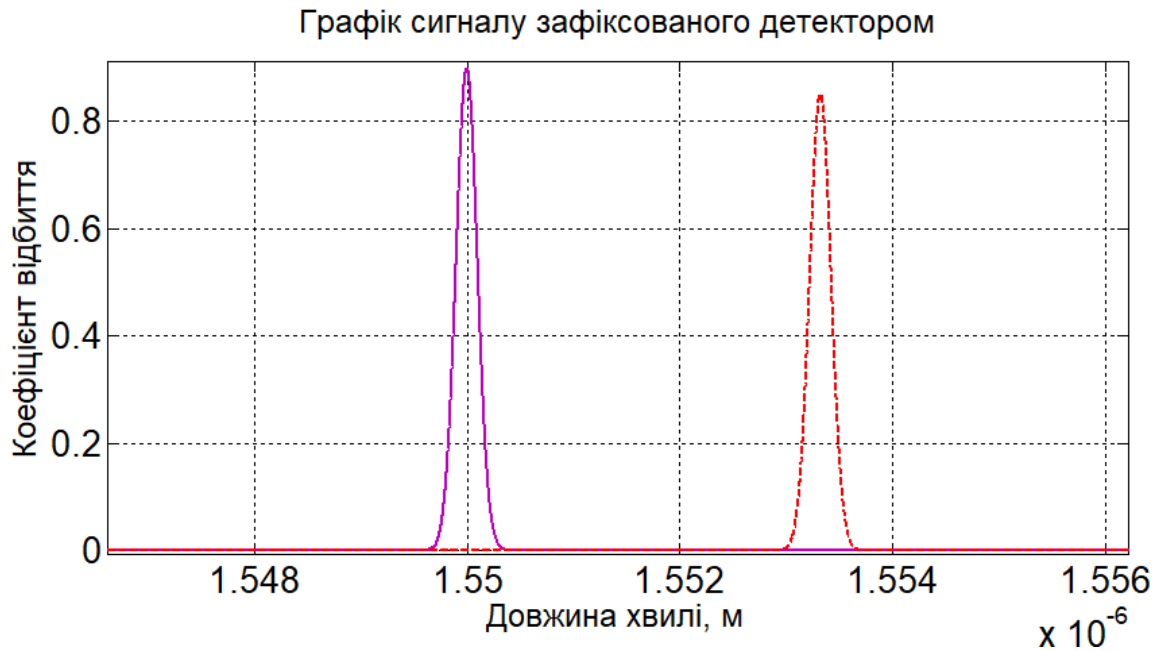


Рис. 3.5 Графік відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

Сигнал, який пройшов через волоконний берегівський датчик являє собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис. 3.4 та відбитого спектру, який представлений на рис.3.5. Графік вихідного спектру зображений на рис. 3.6.

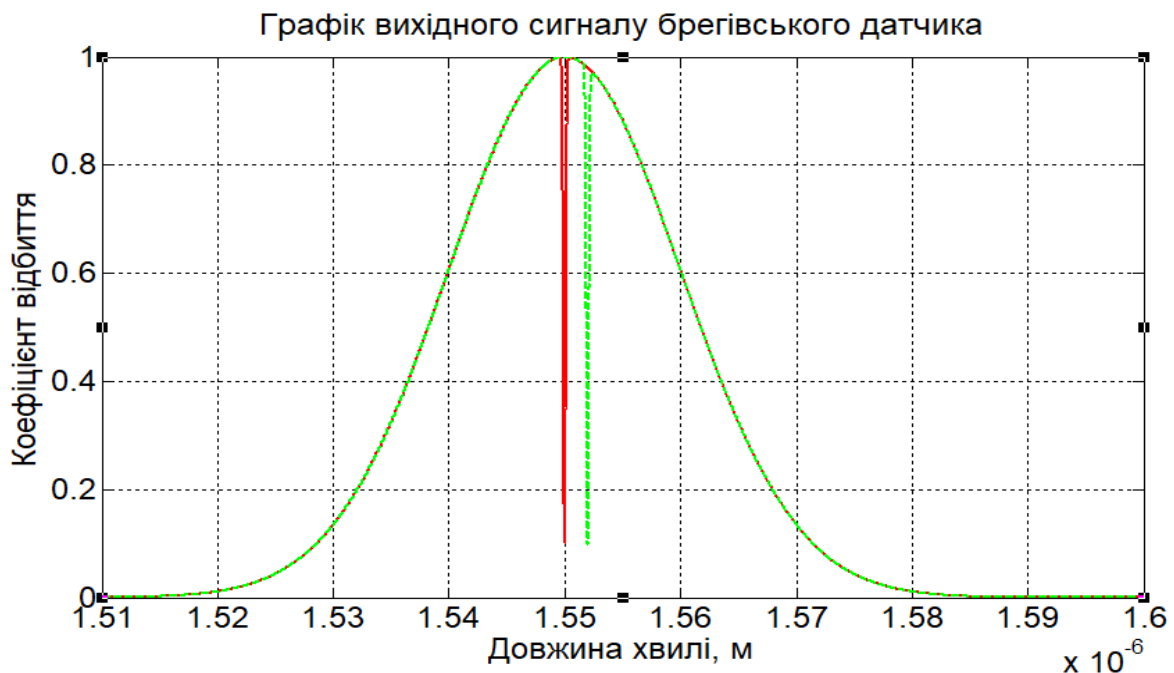


Рис. 3.6 Графік вихідного спектру ВОД

3.3. Моделювання процесу роботи ВОД на основі брегівської решітки з шумом та деформацією

В нормальній роботі датчика сигнал подається з деяким шумом. Дослідимо роботу датчика для реальних (з шумом) умов і задамо деформацію $25 \cdot 10^{-4}$. Сигнал, який подається на брегівський датчик по оптоволокну являє собою світловий промінь з накладеним на нього шумом та такою спектральною характеристикою (рис. 3.8).

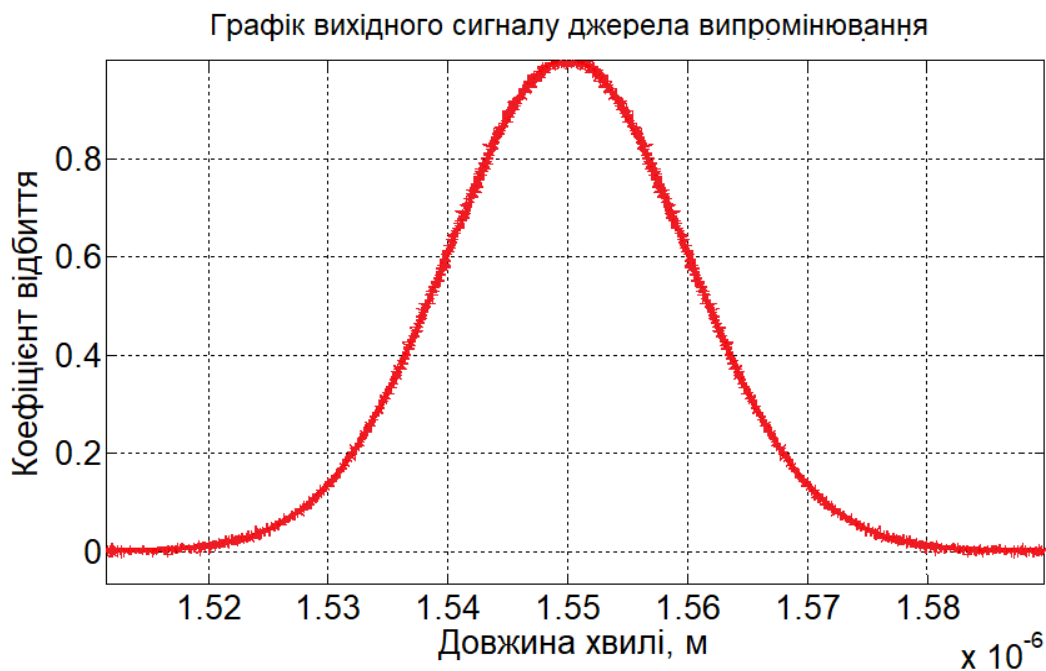


Рис. 3.8. Графік вихідного сигналу випромінювача

Сигнал, який подається через волоконно-оптичний датчик буде пропускатися не повністю, частина сигналу буде відбиватися та фіксуватися детектором. Під час деформації пік відбитого сигналу зміщується відносно початкового значення. Відбита частина сигналу (рис. 3.9).

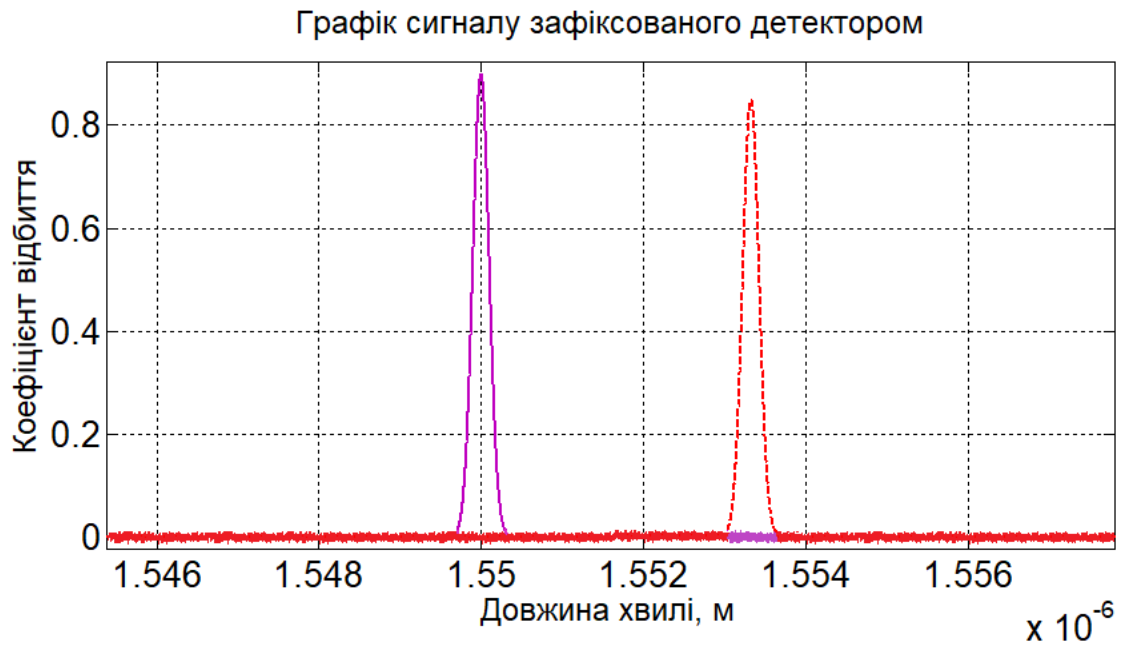


Рис. 3.9 Графік відбитого сигналу зафіксованого детектором з шумом

Сигналу, який пройшов через волоконну брегівську решітку характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру (рис. 3.8) та відбитого спектру (рис. 3.9). Графік спектру, що пройшов (рис. 3.10).

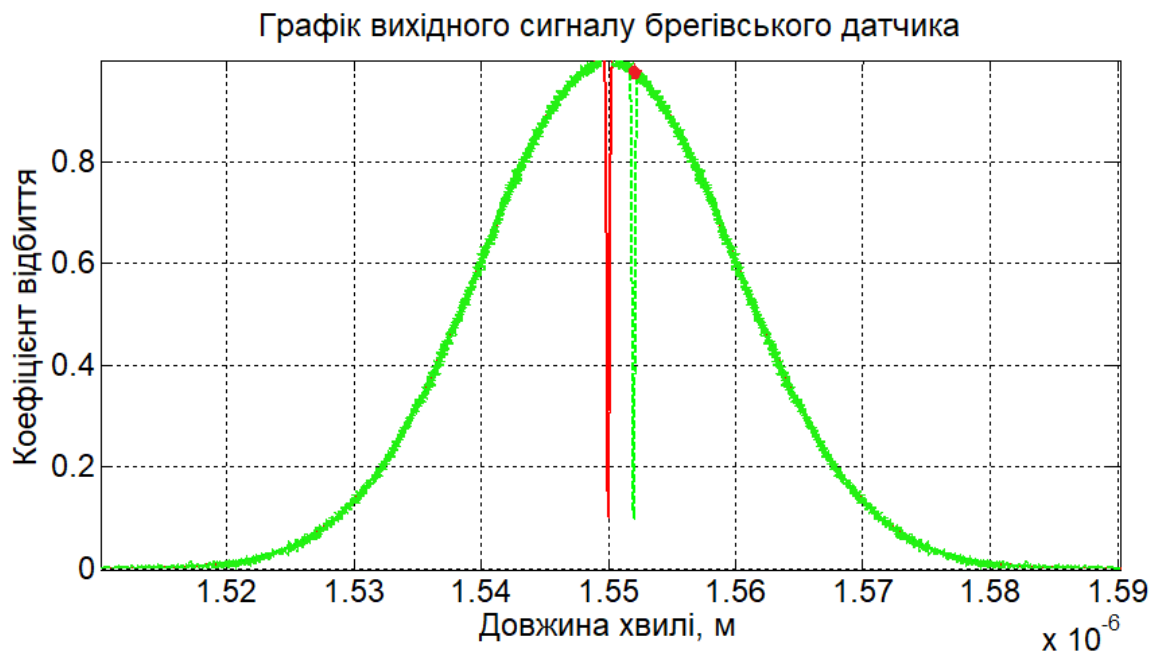


Рис. 3.10 Графік вихідного сигналу ВОД з шумом

З досліджень видно, що при ідеальних і реальних умовах датчик буде працювати нормально так як зсув довжин хвиль не змінюється, а якщо змінюється то не суттєво. Можна сказати, що вплив випадкової похибки не впливає на точність.

3.5. Висновки по моделюванню

Проведено математичне моделювання поведінки волоконно-оптичного датчика на основі брегівських решіток для двох випадків: із впливом деформації та без впливу деформації. Порівнявши 2 дослідження роботи волоконно-оптичного в ідеальних умовах та в реальних умовах можна зробити висновок, що значення зсуву довжини хвилі будуть однаковими це означає, що вплив похибки у вигляді шуму не впливає на точність. Датчик із вибраними параметрами чутливий до відносних деформацій в межах 3-4%.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА»

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів.

В загальному розробка стартап-проекту включає в себе декілька етапів першим з яких являється маркетинговий аналіз стартап-проекту, що включає в себе розробку та опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів. При цьому аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації. На базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту

Наступним етапом являється організація стартап-проекту, що включатиме в себе складання календарного план-графіку реалізації стартап-проекту, проводиться розрахунок потреби в основних засобах та нематеріальних витратах, визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі.

Четвертим етапом являється фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту, що буде включати в себе визначення обсягу інвестиційних витрат, розрахунок основних фінансово-економічних показників проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту), визначатиметься рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

На останньому етапі проводиться визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів, складається інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом, планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів, планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти. Дані етапи реалізовані послідовно та вчасно тому створюють передумови для успішного ринкового старту.

В ході даного розділу буде проведено маркетинговий аналіз стартап-проекту, де буде проаналізовано ринкові можливості для реалізації продукту та відмінності від конкурентів. На базі аналізу ринкового середовища розроблено стратегію ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту, задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

4.1. Опис ідеї

Розглянувши в попередніх розділах основні аспекти моєї теми, можна приступити до розробки стартап-проекту. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту «Моделювання процесу вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика».

Ідея проекту полягає в тому, щоб побачити як буде проходити моделювання процесу вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика в спеціальній написаній програмі, щоб приблизно бачити, які будуть результати і чого треба буде чекати, коли буде проводитися вимірювання цим датчиком в польових умовах, що уточнено наведено в таблиці 4.1.

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Програма для моделювання процесу вимірювання деформації	Дослідницьке моделювання	Швидкість вимірювання, точні дані, мала ціна
	Будівництво	

Отже, пропонується новий спосіб за допомогою якого можна проводити моделювання процесу вимірювання деформації волоконно-оптичним датчиком у спеціальній програмі для отримання первинних даних, які дозволять заздалегідь знати чи буде цей датчик найкращим варіантом для вирішення поставлених задач, а саме для вимірювання деформацій.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Програми розроблені в MATLAB	Програми розроблені в SolidWorks			
1.	Вартість програмного забезпечення	500	2000	2500	-	-	+
2.	Якість	Висока	Висока	Висока	+	-	+
3.	Точність	Висока	Середня	Середня	-	-	+
4.	Алгоритми	Нові або старі покращені	Старі	Старі	-	+	-
5.	Додаткове програмне забезпечення	Так	Так	Так	-	-	+

Висновок: як можна спостерігати з таблиці головними перевагами проекту для потенційних користувачів стала якість, точність вимірювання нові алгоритми та наявність додаткового забезпечення та його невелика ціна. Нейтральною стороною залишились алгоритми і це логічно, тому що задіяні майже одні і ті ж самі алгоритми як і у всіх конкурентів.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

В таблиці 4.3 проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Програма для моделювання процесу вимірювання деформації	Розробка нових алгоритмів	Існуюча технологія	Доступна технологія
		Розробка нового програмного забезпечення	Існуюча технологія	Доступна технологія
		Розробка програми для моделювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика	Не існуюча технологія	Не доступна технологія
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: за рахунок нових алгоритмів для написання програми				

Висновок: проаналізувавши таблицю 4.3. було обрано пункт під номером 1, оскільки нова доступна технологія на ринку, і використання нових алгоритмів в програмі дозволить підвищити якість та ефективність програми, це в свою чергу дозволить вести достойну конкуренцію на ринку технологій.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, що можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяють спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів.

Рентабельність – поняття, що характеризує економічну ефективність виробництва, за якої за рахунок грошової виручки від реалізації продукції (робіт, послуг) повністю відшкодовує витрати на її виробництво й одержується прибуток як головне джерело розширеного відтворення.

Для кількісного виміру рентабельності в цілому по аграрних підприємствах використовують такі три традиційні показники: рівень

рентабельності, норму прибутку і приведено до земельної площі масу прибутку. Рівень рентабельності (R) визначається за формулою:

$$R = \frac{\Pi}{Вв} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

де Π — валовий прибуток від реалізації (робіт, послуг); $Вв$ — виробничі витрати на реалізовану продукцію (її виробнича собівартість). Для повнішої уяви про реальну ефективність певного виду товарної продукції доцільно цей показник обчислювати з врахуванням витрат на її збут, зменшивши при цьому валовий прибуток на величину цих витрат і водночас збільшивши на них знаменник формули. Інвестувати грошові засоби доцільно тоді, коли від цього можна отримати більший прибуток, ніж від їх зберігання у банку (в середньому 14% [36]). Порівнюючи середньорічну рентабельність інвестицій зі ставкою банківського відсотка, можна дійти висновку, що вигідніше.

Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення. За умови, що останній є вищим, можливо, має сенс вкласти кошти в інший проект.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 4.4).

Таблиця 4.1. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	500-2000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнація
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока конкуренція
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність міжнародним стандартам ІЕС 60529 (DIN 40050, ГОСТ 14254-96)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	31%

Висновок: коефіцієнт рентабельності досить високий, а також ринок являється доволі перспективним, оскільки потребує нових розробок та нових рішень. Середня норма рентабельності складає більше 30%, що майже вдвічі вигідніше за депозити в банку, а це в свою чергу, найбільше приваблює інвесторів.

Далі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Таблиця 4.2. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Розробка нових алгоритмів	Інженерні компанії пов'язані з моделюванням деформацій	Перевага надається новим алгоритмам	Низька ціна, висока якість та точність програми
2.	Адаптування програми для різних програмних забезпечень	Клієнти, що користуються різним програмним забезпеченням	Перевага надається адаптуванню до різних програмних забезпечень	Низька ціна, висока якість та точність програми

Висновок: з огляду таблиці видно, що найбільш головними потребами, які формують ринок, стали: розробка нових алгоритмів програми, а також адаптування програми до різних програмних забезпечень. При цьому потенційні клієнти потребують нижчої ціни та високої точності, а також достатньої точності при дії збурень.

Ринкові можливості – це сприятливі обставини, які підприємство може використовувати для отримання переваг. Як приклад ринкових можливостей можна привести погіршення позицій конкурентів, різке зростання попиту, появу нових технологій виробництва продукції, зростання рівня доходів населення і т.

п. Слід зазначити, що можливостями з погляду SWOT-аналізу є не всі можливості, які існують на ринку, а тільки ті, які можна використовувати.

Проведемо аналіз факторів ринкового середовища, що сприяють ринковому впровадженню (табл. 4.6.) проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.7.),. Результати занесемо до таблиці в порядку зменшення значущості:

Таблиця 4.3. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Потреба в розробці кращих алгоритмів програми	Знаходження або переманювання кваліфікованих кадрів для написання алгоритму	Підвищення робітникам заробітної плати для утримання їх на робочих місцях
2.	Потреба в адаптивності для користування різним програмним забезпеченням	Програма не повинна працювати тільки на одному програмному забезпеченні	Відведення додаткового часу та ресурсів для вирішення цієї проблеми

Висновок: як видно з таблиці головними факторами для поліпшення становища даного сегменту ринку являється потреба в розробці кращих алгоритмів програми та в адаптивності для користування в різних програмних забезпеченнях, а знаходження кваліфікованих кадрів дозволить пришвидшити написання алгоритму для виходу нових програм.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 4.7).

Таблиця 4.4. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Зростання конкурентів	Зростання конкурентно-спроможних компаній або фірм	Покращення характеристик програми, випуск нових конкурентно-спроможних продуктів
2.	Поява схожих програм за алгоритмом конкурентів	Фірми-конкуренти можуть розробити аналогічні\або наближені алгоритми	Патентування та подальше удосконалення

3.	Технології	Розвиток нових сучасних технологій може не	Перехід на сучасні технології
----	------------	--	-------------------------------

Висновок: насправді негативних факторів існує більше, ніж представлено в таблиці, хоча в результаті того що даний сегмент ринку являється не насиченим це зменшує можливість негативного впливу.

Далі проведемо аналіз пропозиції (табл. 4.8.), де визначимо загальні риси конкуренції на ринку:

Таблиця 4.5. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: Олігополія	На ринку існує не багато фірм, що випускають продукцію даного типу, оскільки ринок є специфічним.	Потрібно працювати над репутацією компанії, забезпечуючи високу якість приладу.
2. За рівнем конкурентної боротьби: національний	Замовниками таких товарів є фірми з різних куточків світу. Доставка товару не відіграє велику роль в цьому сегменті	Потрібно максимально розширювати горизонти співпраці
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Основною галуззю є будівництво та дослідницьке моделювання	Потрібно розширювати можливості використання програми
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Спостерігається конкуренція між схожими програмами	Підвищення якості та ефективності продукту
5. За характером конкурентних переваг: цінова	Ціни на такі прилади не високі, за допомогою нового алгоритму та нових компонентів збільшується якість продукції	Підприємство може працювати над покращення алгоритму програми або залученням нових алгоритмів
6. За інтенсивністю: марочна	Велику роль відіграє репутація компанії, що виготовляє пристрій	Збільшення кількості реклами

Висновок: провівши ступеневий аналіз на ринку, видно що існує достатня кількість фірм, але за рахунок залучення нових алгоритмів або покращення

старих дасть нам змогу підвищити якість програмної продукції, не піднімаючи при цьому ціну на продукт, за рахунок цих маніпуляцій.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю п'яти сил М. Портера (табл. 4.9.)

Таблиця 5.6. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки: ринок є достатньо насиченим, та конкуренція висока, оскільки компанії, які являються конкурентами мають високу репутацію. Завадою являється необхідний високий рівень капіталовкладень	Програми розроблені в Solid Works MATLAB та інші програми в яких можна проводити моделювання	Висока репутація конкурентних фірм. Необхідний розмір капіталовкладень. Необхідний час на отримання ліцензії	Зазвичай постачальник и не диктують умови співпраці	Споживачі можуть бути чутливими до зміни ціни	Більш кращі товари та послуги, які можуть надати товари-замінники

Висновок: провівши аналіз конкуренції в галузі за М. Портером видно, що є декілька прямих конкурентів і в них висока репутація що впливає в необхідність підвищувати репутацію своєї компанії на той самий рівень (в перспективі).

На основі аналізу конкуренції в галузі, проведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, які були розглянуті в табл. 4.2, вимог споживачів до товару (табл. 4.5.) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6, 4.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз конкурентоспроможності представлено в табл. 4.10.

Таблиця 4.7. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Рівень якості товару та його стабільність	Використання нових алгоритмів та ефективних рішень, що підвищує якість та довіру до товару.
2	Цінова політика	Ціна на продукт буде нижчою ніж в інших компаніях
3	Гнучкість	Можлива адаптація програми для різних програмних забезпечень
4	Програмна частина	Надається перевага у легкості в застосуванні й можливість швидкого навчання
5.	Готова методика виготовлення	При готовій методиці виготовлення зменшується час очікування для покупця
6.	Обслуговування	Споживачі потребуються консультування як в технічних так і в експлуатаційних питаннях
7.	Репутація	У зв'язку зі специфічності даного сегменту ринку даний фактор є важливим для остаточного рішення клієнта

Висновок: як можна побачити з таблиці було обґрунтовано сім факторів конкурентоспроможності, основними з яких стали: цінова політика (як показує практика це стоїть на першому місці для клієнта), рівень якості товару та його стабільність (найважливіший фактор) та репутація компанії, оскільки якщо перші два фактори співпадатимуть з очікуваннями клієнта, репутація компанії його схилить в потрібний бік.

Таблиця 4.8. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «DUST_METER»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з програмами розробленими в Solid Works та Matlab						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Рівень якості товарів	18						+	
2	Готова методика виготовлення	17				+			
3	Гнучкість	17	+						
4	Програмна частина	19		+					
5.	Цінова політика	14						+	
6.	Репутація	18							+
7.	Обслуговування	16					+		

З таблиць 4.10 та 4.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок при впровадженні нового

програмного забезпечення для розрахунку концентрації пилу. Основною перевагою та головним досягненням є висока якість продукту та технічна підтримка на протязі всього терміну його використання споживачем.

Таблиця 4.9. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Гнучка цінова політика; 2. Можливість використання в різних програмних забезпеченнях; 3. Висока якість товару; 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Низька репутація підприємства на початку впровадження проекту в життя; 2. Необхідність значного початкового капіталовкладення (кредит в банку)
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Швидкий розвиток за рахунок доступності технології; 2. Модифікація алгоритму програми. 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Винайдення кращих алгоритмів обробки даних; 2. Мінливість ринку.

Висновок: для успішності стартап-проекту необхідно передбачати появу несприятливих умов для можливості швидкого реагування, коригування дій і, відповідно, зменшення негативних наслідків. Для подолання низької репутації необхідно постійно покращувати свою продукцію та прислухатись до побажань та критики клієнтів.

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.10. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Створити прототип програми	Отримання ресурсів буде швидким за рахунок швидкої доставки вже готової продукції	7-14 днів
2	Залучення до програми нових алгоритмів	Програмне удосконалення потребує певного часу на розробку	20-30 днів

Висновок: кращим вибором можна вважати використання першого пункту – так як чекати прийдеться всього 1 неділю, якщо потрібно його виконати швидко та якісно. Щоправда за швидкістю цей варіант не найкращий, але він завжди дозволить виготовляти якісну та конкурентно-спроможну продукцію. З зазначених альтернатив обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.11. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Дослідницьке моделювання	Висока	Середній	Інтенсивна	Середня складність
2.	Будівництво	Висока	Середній	Не інтенсивна	Середня складність
Цільова група: дослідницьке моделювання, будівництво					

Висновок: за результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи такі як дослідницьке моделювання та будівництво. Цей вибір було зроблено через невисоку інтенсивність конкуренції в обраних сегментах та через невисокі складності для входу у вибрані сегменти. А якщо ціна нашого товару буде відповідати бажанням клієнтам в науковому сегменті, то потрапити в цей сегмент буде дуже просто.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 4.15.)

Таблиця 5.12. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Використання нових алгоритмів до програми	Швидке налаштування виробництва	Можливо закупляти вже розроблені алгоритми, але через це на ринку будуть однакові програми, які будуть тільки відрізнятися ціною	Стратегія диференціації

Висновок: визначена базова стратегія розвитку проекту – стратегія диференціації, оскільки ця стратегія зорієнтована на задоволення певних потреб клієнта, а саме висока якість, яка підвищує лояльність покупців, створюючи труднощі для альтернативних продавців у боротьбі за їхню прихильність. Якість товарів дає змогу встановлювати вищі ціни, так як споживачі готові їх сприйняти.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 5.13. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Переманювати клієнтів у фірм конкурентів	Для початку будемо купувати схожі алгоритми, але потім планується розробка своїх	Поступово підніматися ввєрх, за рахунок низької ціни

Висновок: як видно з таблиць 4.14-4.16 обрано цільовими групи іграва індустрія, дослідницькі компанії, що потребують стратегії диференціації, що дозволить за рахунок детального аналізу вивченні запитів, поведінки покупців шукати нових споживачів, та забирати існуючих у конкурентів.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробимо стратегію позиціонування (табл. 4.17).

Таблиця 4.14. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Висока якість продукту. Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка. Якість
2.	Обслуговування	Стратегія диференціації	Легке обслуговування	Легкість простота в використанні, якість, швидкість
3.	Якість	Стратегія диференціації	Швидкість, гнучкість	Ціна, якість

Висновок: крім високої якості та низької ціни потребує легкості в обслуговуванні, простоти в використанні та оновлення програмного забезпечення.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.15. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Якість	Високі характеристики стабільності програми, простота у використанні	Можливість підвищити якості та точності за рахунок кращих дорогих алгоритмів системи програми. Швидка адаптація (простота в використанні)
2.	Швидкість	Швидкість роботи приладу	Висока швидкість за рахунок нових технологій

Висновки: вигідними сторонами товару являються високі характеристики стабільності програми та простота у використанні, точності та швидкості роботи, що надає перевагу даній програмі у порівнянні з конкурентами. В майбутньому, використання нових алгоритмів програми дозволить вивести програму на високий рівень.

Таблиця 4.16. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові	
I. Товар за задумом	Програма, яка буде проводити процес моделювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика	
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	
	1. Нові алгоритми	Застосування нових алгоритмів для підвищення точності
	2. Оновлювання раз в 1 рік	Буде проводитися оновлення, щоб програма не застарівала
	3. Додаткове програмне забезпечення	Додавання нових можливостей
	Якість: відповідає нормам ДСТУ2499:2017	
Пакування: програмне забезпечення записане на компакт диск.		
III. Товар із підкріпленням	До продажу з введенням у роботу	
	Після продажу – технічна підтримка, оновлення програми	
Потенційний товар буде захищено від копіювання за рахунок логотипу, введення комерційної таємниці на розрахунки та конструкцію модуля, патент.		

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 4.20).

Таблиця 4.17. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	10-30	200	250	100-500

Висновок: як видно з таблиці збільшення кількості клієнтів дозволить ціна на пристрій, що являється нижчою, ніж ціна на сучасні аналоги. Нижній рівень відповідає ціні товарів-замінників, які можна використовувати в системах, там де висока точність не потрібна, наш пристрій це золота середина з відносно низькою ціною та більшою точністю.

Таблиця 4.18. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Попереднє замовлення з підписанням контракту	доставка в строки, контроль за уникненням пошкоджень, налаштування	Пряма	Пряма

Висновок: у зв'язку з тим, що обслуговується вузький сегмент ринку доцільніше не використовувати посередників, а застосовувати прямий канал збуту. Це дасть змогу точніше контролювати ціни у порівнянні з конкурентами, і зосередити доходи в одних руках, не розсіюючи їх на посередників.

Таблиця 4.19. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Огляд продукту, перспективи на майбутнє	Інтернет, гаряча лінія	Маркетингові дослідження. Встановлення мети позиціонування. Розробка стратегії позиціонування. Розробка тактики позиціонування. Розробка комплексу маркетингу. Оцінка ефективності позиціонування.	Розповсюдження інформації про продукт	Підкреслення переваг продукту

Висновок: Було обрано ключові позиції: маркетингові дослідження, встановлення мети позиціонування, розробка стратегії позиціонування, розробка тактики позиціонування, розробка комплексу маркетингу, оцінка ефективності позиціонування. Розглянуто завдання рекламного повідомлення та концепцію рекламного звернення.

4.6. Висновки

Пропонується новий спосіб за допомогою якого можна проводити моделювання процесу вимірювання деформації волоконно-оптичним датчиком у спеціальній програмі для отримання первинних даних, які дозволять заздалегідь знати чи буде цей датчик найкращим варіантом для вирішення поставлених задач, а саме для вимірювання деформацій.

Основними споживачами приладу будуть люди, вікової категорії –18 років.

Зважаючи на проведений аналіз ринку потенційного стартап-проекту, можна із впевненістю стверджувати, що точна та дешева у реалізації програма буде привертати увагу потенційних інвесторів у проект, а розрахована рентабельність буде вигідніша за банківські вклади майже вдвічі, це призведе до

потенційно успішного стартапу. Розвиток у будівництві та дослідницькому моделюванні, завжди мають великий успіх у реалізаціях, оскільки інвестори бажають витратити гроші на проекти, які можуть давати реальний прибуток.

Сильними сторонами проекту «Моделювання процесу вимірювання деформації волоконно-оптичним датчиком» стали висока якість та ціна за одну одиницю виробу, що в порівнянні з конкурентами дає великий бонус в боротьбі за кінцевого споживача. Також досить невелика ціна в 500 грн приверне увагу для дослідницької сфери, в тому числі для студентів та викладачів.

Серед можливих конкурентів, можна виокремити лише програми написані в основному в Matlab, Solid Works та інші, їх ціль полягає в більш комплексному підході. Однією з переваг розроблювального проекту – його фінансова складова, яка не потребує значних капіталовкладень, але прибуток з продажів може виправдати себе дуже скоро. При цьому середня ціна аналогічних програм являється високою, але за рахунок підвищення точності та якості продукту, розроблений нами, буде на порядок привабливішим для потенційних клієнтів.

Для реклами та збільшення обсягів збуту пропонується надавати додаткові послуги з обслуговування, гарантії, налаштування тощо. Доцільно вважати, що необхідно вкласти у стартап-проект суму мінімум в \$10000.

ВИСНОВКИ

Опрацювавши тему «Моделювання процесу вимірювання деформації волоконно-оптичного датчика», можемо зробити такі висновки:

По-перше, було розглянуто датчики для вимірювання деформації з метою моніторингу та контролю напружено-деформованого стану інженерних конструкцій: дротяні датчики, фольгові датчики, високотемпературні датчики, напівпровідникові датчики, волоконно-оптичні датчики. Серед розглянутих датчиків було обрано волоконно-оптичні датчики для використання їх у системах моніторингу, бо вони мають такі переваги – вибухобезпечність, безіндукційність, еластичність, широкосмуговість, механічна міцність, відсутність взаємної інтерференції, висока електроізоляційна міцність та висока корозійна стійкість, до хімічних розчинників, мастил, води, малі втрати вимірювання, діаметр і маса. Вони характеризуються високою точністю вимірювання, підходять для виміру статичних і динамічних напруг, не спотворюючи отримані дані, працюючи навіть в екстремальних умовах, а невеликі розміри дають змогу використовувати датчики практично в будь-яких вимірювальних пристроях, мають низьку собівартість у порівнянні з дорогими аналогами.

По-друге, досліджено характеристики волоконно-оптичного датчика, розроблено його математичну модель, розглянуто методику побудови інформаційно-вимірювальних систем із використанням волоконних брегівських решіток, що дало можливість побудувати найпростішу сенсорну систему та методи опитування волоконно-оптичних систем, методи побудови волоконно-оптичних систем із використанням волоконних брегівських решіток.

По-третє, проведено математичне моделювання поведінки волоконно-оптичного датчика на основі брегівських решіток для двох випадків: із впливом деформації та без впливу деформації. Порівнявши 2 дослідження роботи волоконно-оптичного в ідеальних умовах та в реальних умовах можна зробити висновок, що значення зсуву довжини хвилі будуть однаковими це означає, що

вплив похибки у вигляді шуму не впливає на точність. Датчик із вибраними параметрами чутливий до відносних деформацій в межах 3-4%.

По-четверте, пропонується новий спосіб, за допомогою якого можна проводити моделювання процесу вимірювання деформації волоконно-оптичним датчиком у спеціальній програмі для отримання первинних даних, які дозволять заздалегідь знати чи буде цей датчик найкращим варіантом для вирішення поставлених задач, а саме для вимірювання деформацій.

Основними споживачами приладу будуть люди вікової категорії –18 років.

Зважаючи на проведений аналіз ринку потенційного стартап-проекту, можна із упевненістю стверджувати, що точна та дешева у реалізації програма буде привертати увагу потенційних інвесторів у проект, а розрахована рентабельність буде вигідніша за банківські вклади майже вдвічі, це призведе до потенційно успішного стартапу. Розвиток у будівництві та дослідницькому моделюванні, завжди мають великий успіх у реалізаціях, оскільки інвестори бажають витратити гроші на проекти, які можуть давати реальний прибуток.

Сильними сторонами проекту «Моделювання процесу вимірювання деформації волоконно-оптичним датчиком» стали висока якість та ціна за одну одиницю виробу, що в порівнянні з конкурентами дає великий бонус у боротьбі за кінцевого споживача. Також досить невелика ціна в 500 грн приверне увагу для дослідницької сфери, у тому числі для студентів та викладачів.

Серед можливих конкурентів, можна виокремити лише програми написані в основному в Matlab, Solid Works та інші, їх ціль полягає в більш комплексному підході. Однією з переваг розроблювального проекту – його фінансова складова, яка не потребує значних капіталовкладень, але прибуток із продажу може виправдати себе найближчим часом. При цьому середня ціна аналогічних програм є високою, але за рахунок підвищення точності та якості продукту, розробленого нами, буде на порядок привабливішим для потенційних клієнтів.

Для реклами та збільшення обсягів збуту пропонується надавати додаткові послуги з обслуговування, гарантії, налаштування тощо. Доцільно вважати, що необхідно вкласти у стартап-проект суму мінімум у \$10000.

ЛІТЕРАТУРА

1. Энциклопедия в 4-х томах. Гражданская защита. Пучков В.А. Т. II (К – О) — М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. – 624 с.
2. Геодезичний моніторинг. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://geodez.com.ua/geodezichniy-monitoring-budivel-i-sporud>
3. Геодезичні методи дослідження деформацій споруд. Зайцев А.К., Марфенко С.В., Міхел Д.Ш. та ін. - М. Недра., 1991. - 272 с.
4. Лазерне сканування. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.trio-r.ru/poly_cat-ngk-lsk2006.php
5. Наземне лазерне сканування. введення в технологію. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.gsi.ru/catalog.php?id=1>
6. Антонович К.М. Використання супутникових радіонавігаційних систем в геодезії. У 2 т. Т.2. Монографія / К.М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибірська державна академія». - М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. - 360 с.
7. Великий енциклопедичний словник. - 2-е изд., перераб. і доп. - М.: Велика російська енциклопедія. - СПб: Норинт, 2002. - 1456 с.
8. Жуков Б.М., Карпик А.П. Геодезичний контроль інженерних об'єктів промислових підприємств і цивільних комплексів.- Новосибірськ: СМДА, 2003. - 356 с.
9. Luccio M. The concrete and the clay: monitoring large structure deformation // GPS World, Vol. 13, No. 8. - 2002. - P. 16. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817322403>
10. Деформація. Види деформації. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://moyaosvita.com.ua/fizuka/deformaciya-vidi-deformacij-tverdix-til/>
11. Дротяні тензодатчики. Фольгові тензодатчики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studopedia.com.ua>
12. Волоконно-оптичні датчики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.laser-portal.ru/content_359

13. Проектування системи моніторингу будівлі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/thesis/s012/s012-134.pdf>
14. Волоконно-оптический датчик деформации. А. Неугольников, В. Поспелов. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.electronics.ru/journal/article/692>
15. Волоконно-оптические датчики Распределения Деформации и Температуры [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0115RU.pdf
16. Измерительное устройство контроля деформации и температуры на основе наноразмерный волоконно-оптических датчиков. Карасик В. Е., Лазарев В. А., Неверова Н. А. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://ntv.ifmo.ru/ru/article/1082/izmeritelnoe_ustroystvo_kontrolya_deformacii_i_temperatury_na_osnove_nanorazmernihvolokonno-opticheskikh_datchikov.htm
17. Тензометрический метод измерения деформации. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ssau.ru/files/education/uch_posob
18. Fundamentals of Fiber Bragg Grating (FBG) Optical Sensing/ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ni.com/white-paper/11821/en>
19. Hill K.O. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication / K.O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki. – Appl. Phys. Lett. 32, 1978. – 647 p.
20. Meltz, G. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. G. Meltz, et al, Opt. Lett. 14 (15), 1989. – P. 823.
<http://www.phosfos.eu/eng/Phosfos/Journals/Bragg-grating-in-polymer-optical-fiber-for-strain-bend-and-temperature-sensing>
21. Stubbe R. Novel technique for writing long superstructured fiber Bragg gratings, in Postdeadlin Papers. R. Stubbe, B. Sahlgren, S. Sandgren and A. Asseh, Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Glass Waveguides: Fundamentals and Applications, Vol. 22of 1995 Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D.C., 1995), p. PD 1.

22. Petermann I. Fabrication of advanced fiber Bragg gratings by use of sequential writing with a continuous-wave ultraviolet laser source. I. Petermann, B. Sahlgren, S. Helmfrid, A.T. Friberg. *Applied Optics*. 41, 2002. – P. 1051–1056.
23. Arkhipov S.V. Point-by-point inscription of fiber Bragg gratings into birefringent optical fiber through protective acrylate coating by Ti:Sa femtosecond laser. S.V. Arkhipov, M. Grehn, S.V. Varzhel, V.E. Strigalev, N. Griga, H.J. Eichler. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015. – P. 373–377.
24. Canning J. *Fiber Gratings and Devices for Sensors and Lasers*, Lasers and Photonics Reviews. J. Canning. 2 (3), Wiley, USA, 2008. – P. 275-289.
25. Liu Y. *Advanced fiber gratings and their application*. Y. Liu, Thesis, Aston University, 2001.
26. Simpson A. G. *Optical Fiber Sensors and Their Interrogation*. A. G. Simpson. Thesis, Aston University, 2005.
27. Simpson A. G. A method for the fabrication of temperature compensating IA-I strain sensors. A. G. Simpson, K. Kalli, K. Zhou, L. Zhang, I. Bennion. Nara, Japan, 2003.
28. Canning J. *Fiber Gratings and Devices for Sensors and Lasers*, Lasers and Photonics Reviews. J. Canning. 2 (4), Wiley, USA, 2008. – P. 275-289.
29. Canning J. *Extreme silica optical fibre gratings*. J. Canning, M. Stevenson, S. Bandyopadhyay, K. Cook, 2008.
30. Othonos A. *Fiber Bragg Gratings – Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. A. Othonos, K. Kalli. Artech House, 1999.
31. Васильев С. А. Волоконные решётки показателя преломления и их применения. С. А. Васильев и др., 35 (12), 2005. – С. 1085—1103.
32. Ferraro P. On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring. P. Ferraro, G. De Natale. *Optics and Lasers in Engineering*. 37 (2–3), 2002. – P. 115–130.

33. Вимірювальний пристрій на основі квазірозподілених волоконно-оптичних датчиків на бреггівських ґратках. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://bd.patent.su/2377000-2377999/pat/serv1/servleta166.html>

34. Becker M. Fiber Bragg Grating Inscription with UV Femtosecond Exposure and Two Beam Interference for Fiber Laser Applications. M. Becker, S. Bruckner, E. Lindner, M. Rothhardt, S. Unger, J. Kobelke, K. Schuster, H. Bartelt // Proc. of SPIE. – 2010. – V. 7750.

35. Hill K. O. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki // Appl. Phys. Lett, 1978. – P. 647-649.

36. Digonnet M. J. F. Acoustic Fiber Sensor Arrays / M. J. F. Digonnet, B. J. Vakoca, C. W. Hodgson, G. S. Kino, L. Edward // Second European Workshop on Optical Fibre Sensors. Proc. SPIE, 2004.

37. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings. R. Kashyap. San Diego, CA: Academic Press, 1999. – 478 p.

38. Васильев С. А. Волоконные решетки показателя преломления и их применение / С. А. Васильев, О. И. Медведков, И. Г. Королев, А. С. Божков, А. С. Курков, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. 2005. – С. 1085-1103.

39. Kersey A. D. Fiber Grating Sensors / A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koо, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele / Journal of Lightwave Technology. 1997. – P. 1442-1463.

40. Сазонкин С. Г. Сравнение методов измерения и моделирования спектров отражения волоконных брегговских решеток / С. Г. Сазонкин, Д. А. Дворецкий, Л. К. Денисов, А. Б. Пнёв, В. А. Лазарев / НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ: ЭЛЕКТРОННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ. - (2012). - (06), 22. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <http://technomag.edu.ru/doc/422468.html>

41. Моделювання та його види. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <http://bourabai.kz/cm/bahvalov2.htm>