

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний

(назва факультету, інституту)

Приладів і систем орієнтації та навігації

(назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 681.786

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Бурау Н.І.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« _____ » _____ 2019 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код та назва спеціальності)

на тему: «Імітаційне моделювання волоконно-оптичного датчика»

Виконав: студент VI курсу, групи ПГ-81мп

(шифр групи)

Аксініченко Віталій Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

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

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з: Розробка стартап-проекту

(назва розділу)

доц., к.е.н. Бояринова К. О.

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент:

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

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

Студент

(підпис)

Київ – 2019

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Інженерні та будівельні конструкції під час експлуатації знаходяться під впливом зовнішніх збурюючих факторів, що призводить до появи дефектів. Дефекти можуть проявлятися у вигляді тріщин, які згодом призводять до руйнування конструкції. Для попередження пошкоджень конструкцій проводиться моніторинг та діагностика, які дають змогу слідкувати за технічним станом будівлі і є досить актуальними в наш час.

Мета – промоделювати процес вимірювання деформації волоконно-оптичним датчиком.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- 1) Провести порівняльний аналіз первинних перетворювачів для вимірювання деформації.
- 2) Дослідити характеристики обраного типу первинних перетворювачів для забезпечення високої точності вимірювання деформації.
- 3) Провести моделювання волоконно-оптичного датчика.
- 4) Розробити стартап-проект

Об'єкт дослідження: вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток.

Предмет дослідження: волоконно-оптичний датчик.

Наукова новизна. На основі математичного моделювання досліджено вплив низької температури на вихідний сигнал бреггівського волоконно-оптичного датчика.

Практична цінність. Полягає у використанні волоконно-оптичних датчиків на основі бреггівських решіток у системах моніторингу для проведення поточного контролю технічного стану інженерних споруд.

Апробація результатів. Результати дослідження доповідалися на XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень» (м. Київ, 2018) та XV

Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень» (м. Київ, 2019).

Публікації. За темою магістерської дисертації опубліковано 2 статті у збірниках матеріалів науково-практичній конференцій.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з 3 розділів та висновків, 54 рисунків, 23 таблиць, списку використаних джерел із 33 позицій та 2 додатків. Загальний обсяг роботи – 113 сторінки, серед яких основна частина викладена на 79 сторінках.

Ключові слова. Моніторинг, датчики деформації, деформація, температура, показник заломлення, оптичне волокно, моделювання, волоконні брегівські решітки, брегівська довжина хвилі, волоконно-оптичний датчик, період решітки.

ABSTRACT

Actuality of theme. The engineering and building structures during operation are influenced by external disturbances, which leads to defects. Defects can occur in the form of cracks, which subsequently lead to the destruction of the structure. To prevent damage to structures, monitoring and diagnostics are being carried out, which make it possible to monitor the technical condition of the building and are quite relevant today.

The purpose is to simulate the deformation measurement process with a fiber optic sensor.

To achieve this goal, you need to solve the following problems:

- 1) Conduct comparative analysis of primary transducers for strain measurement.
- 2) Investigate the characteristics of the selected type of primary transducers to ensure high accuracy of strain measurement.
- 3) Carry out simulation of fiber optic sensor.
- 4) Develop a startup project

Object of research: strain measurement using a fiber optic sensor based on Bragg gratings.

Subject of research: fiber optic sensor.

Scientific novelty. The influence of low temperature on the output signal of the Bragg fiber optic sensor was investigated on the basis of mathematical modeling.

Practical value. The use of fiber-optic sensors based on Bragg gratings in monitoring systems is used for the ongoing control of the technical condition of engineering structures.

Test results. The results of the study were reported at the XIV All-Ukrainian Scientific-Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Efficiency of Engineering Solutions" (Kyiv, 2018) and the XV-th All-Ukrainian Scientific-Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Efficiency of Engineering Solutions" (Kyiv 2019).

Publications. On the topic of the master's thesis, 2 articles were published in the proceedings of scientific and practical conferences.

Structure and volume of dissertation. The work consists of 3 sections and conclusions, 54 figures, 23 tables, a list of sources used from 33 positions and 2 appendices. The total volume of work is 113 pages, of which the main part is set out on 79 pages.

Keywords. Monitoring, strain gauges, deformation, temperature, refractive index, optical fiber, simulation, fiber coast lattices, coast wavelength, fiber optic sensor, lattice period.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1.....	14
ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	14
1.1. Аналіз і огляд систем моніторингу	14
2.1. Огляд датчиків систем моніторингу	19
1.2.1. Категорії датчиків деформації	19
1.2.2. Акселерометр.....	20
1.2.3. Інклінометр	21
1.2.4. Датчики тиску.....	22
1.2.5. Тахеометр.....	23
1.2.6. Тензодатчик	26
1.2.7. Пізоелектричний датчик	29
1.2.8. Магнітопружний датчик.....	30
1.2.9 Волоконно-оптичні датчики	31
РОЗДІЛ 2.....	39
МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ.....	39
2.1. Волоконно-оптична система моніторингу.....	39
2.2. Принцип роботи волоконно-оптичної системи	40
2.3. Моделювання волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток	41
2.3.1. Моделювання системи на основі одного датчика ВБР без деформації та впливу температури	43

2.3.2. Моделювання системи на основі одного датчика ВБР з деформацією та без впливу температури	45
2.3.3. Моделювання системи на основі одного датчика ВБР з деформацією та з впливом температури.....	47
2.3.4. Моделювання системи на основі одного датчика ВБР з деформацією, зміною температури при різних значеннях періоду бреггівської решітки	50
2.3.5. Моделювання п'яти ВОД з рівномірно розподіленими періодами решіток	59
2.3.6. Моделювання п'яти ВОД з нерівномірно розподіленими періодами решіток	62
2.3.7. Моделювання системи на основі 25-ти датчиків ВБР з деформацією	66
2.3.8. Моделювання системи на основі декількох датчиків ВБР з зміною температури	68
2.3.9. Моделювання системи на основі декількох датчиків ВБР під впливом деформації та зміною температури	68
2.3.10. Висновок до розділу 2.....	70
РОЗДІЛ 3.....	71
3.1. Розробка стартап-проекту «Імітаційне моделювання волоконно-оптичного датчика».....	71
3.2. Опис ідеї.....	72
3.2. Технологічний аудит ідеї проекту	74
3.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	76
3.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	84
3.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	87
3.6. Висновки	91
ВИСНОВКИ.....	93

Список використаних літературних джерел.....	94
ДОДАТКИ.....	98
Додаток А.....	98
Додаток Б.....	102

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ВОД – волоконно-оптичний датчик;

ВБР – волоконні Брегговські решітки;

ТКЛР – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

МЕМС – мікроелектромеханічні системи;

ЕМ поля – електромагнітні поля;

GPS – Global Positioning System;

Λ – період решітки;

n_{enn} – ефективний показник заломлення;

p_{11} , p_{12} – коефіцієнти Поккельса в тензорі оптичних напруг;

ν – коефіцієнт Пуассона;

α_{Λ} – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

α_n – термооптичний коефіцієнт;

$\lambda_{БР}$ – бреггівська довжина хвилі;

ε – деформація.

ВСТУП

У процесі експлуатації інженерні і будівні споруди знаходяться під впливом природних або техногенних факторів, які можуть привести до виникнення мікротріщин або пластичних деформацій. Такі дефекти можуть привести до погіршення технічного стану або руйнування споруди. Моніторинг і діагностика поточного технічного стану об'єкта, а також прогнозування його зміни на сьогоднішній день являються найбільш ефективними способами попередження руйнування інженерних та будівних споруд [1].

Моніторинг і діагностика проводяться як на стадіях будівництва, капітального ремонту, реконструкції, так і на стадії експлуатації інженерних та будівних споруд. Завдяки своїм особливостям (нечутливість до зовнішніх електромагнітних полів, вибухо- та пожежобезпечність, низькі оптичні втрати, висока корозійна стійкість, мала маса та розмір, низька вартість, висока міцність та гнучкість для здійснення моніторингу все частіше використовуються волоконно-оптичні датчики. Із всіх різновидів волоконно-оптичних датчиків, придатних для виміру деформації, брегівські датчики мають найкращу швидкодію та є найбільш стійкими до зовнішніх впливів. Тому найбільш перспективними датчиками для вимірювання деформації є волоконно оптичні датчики на основі брегівських решіток. [1].

Актуальність теми. Інженерні та будівельні конструкції під час експлуатації знаходяться під впливом зовнішніх збурюючих факторів, що призводить до появи дефектів. Дефекти можуть проявлятися у вигляді тріщин, які згодом призводять до руйнування конструкції. Для попередження пошкоджень конструкцій проводиться моніторинг та діагностика, які дають змогу слідкувати за технічним станом будівлі і є досить актуальними в наш час.

Мета – промодельовати процес вимірювання деформації волоконно-оптичним датчиком.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- 5) Провести порівняльний аналіз первинних перетворювачів для вимірювання деформації.
- 6) Дослідити характеристики обраного типу первинних перетворювачів для забезпечення високої точності вимірювання деформації.
- 7) Провести моделювання волоконно-оптичного датчика.
- 8) Розробити стартап-проект

Об’єкт дослідження: вимірювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток.

Предмет дослідження: волоконно-оптичний датчик.

Наукова новизна. На основі математичного моделювання досліджено вплив низької температури на вихідний сигнал бреггівського волоконно-оптичного датчика.

Практична цінність. Полягає у використанні волоконно-оптичних датчиків на основі бреггівських решіток у системах моніторингу для проведення поточного контролю технічного стану інженерних споруд.

Апробація результатів. Результати дослідження доповідалися на XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень» (м. Київ, 2018) та XV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень» (м. Київ, 2019).

Публікації. За темою магістерської дисертації опубліковано 2 статті у збірниках матеріалів науково-практичній конференцій.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з 3 розділів та висновків, 54 рисунків, 23 таблиць, списку використаних джерел із 33 позицій та 2 додатків. Загальний обсяг роботи – 113 сторінки, серед яких основна частина викладена на 79 сторінках.

Ключові слова. Моніторинг, датчики деформації, деформація, температура, показник заломлення, оптичне волокно, моделювання, волоконні брегівські решітки, брегівська довжина хвилі, волоконно-оптичний датчик, період решітки.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1. Аналіз і огляд систем моніторингу

Сучасне будівництво і технічна експлуатація будівель повинні забезпечувати і вирішувати питання безпеки життєдіяльності людини. Поява нових завдань в зв'язку з інноваційними процесами в технології будівництва, впровадження маловивчених матеріалів, будівництво будівель в умовах щільної міської забудови в короткі терміни, вітрові навантаження, що ростуть з кожним роком, вага і швидкість руху транспорту, вібрації від транспортних потоків, зміни в ґрунтах надають негативний вплив на стан будівельних конструкцій і всієї будівлі в цілому. В достатній мірі негативну реакцію на ці фактори можна зменшити, попередивши наслідки їх впливу. Суттєвим моментом у підвищенні ефективності технічного обслуговування і ремонту будівель є переведення їх на проектну основу. Проектування, будівництво та експлуатацію кожної будівлі об'єднує застосування єдиних параметрів експлуатаційних якостей. При проектуванні експлуатаційні якості визначаються вибором матеріалів, розрахунком конструкцій, об'ємно-планувальним рішенням, інженерним обладнанням відповідно до призначення будинку. Одним з інструментів, спрямованих на підтримку необхідних рівнів надійності і функціональності споруди, є інструментальний моніторинг. Моніторинг - це процес безперервного контролю поточного стану об'єкта з накопиченням інформації та оцінкою отриманої інформації з метою ідентифікації поточного стану об'єкта, контроль зміни цього стану в часі і взаємодії об'єктів з природними і техногенними впливами на них. Система моніторингу інженерних конструкцій - це система датчиків, розподілених по спорудженню, інформація від яких постійно зводиться в центр прийому. Після чого ця інформація виводиться в зручному для сприйняття вигляді і зберігається.

Технічна база систем моніторингу - це обладнання, яке випускається провідними компаніями - загально визнаними світовими лідерами у виробництві засобів контролю та вимірювань, а також засобів обчислювальної техніки і електроніки. Система інструментального моніторингу інженерних конструкцій складається з датчиків і автономних блоків збору даних, які встановлюються на об'єкті або контрольній станції. Датчики з'єднуються з блоками збору даних за допомогою дротового або бездротового системи передачі [2]. Контрольна станція застосовується для збору інформації, що надходить від блоків збору інформації, записи результатів на стаціонарний і знімний носії. Застосовувана номенклатура і кількість датчиків визначається проектом і може змінюватися. Номенклатура сучасних застосовуваних датчиків:

- кліматичні датчики: сили і напрямку вітру, температури і вологості.
- тензометричні датчики деформації (напруження).
- акселерометри - датчики прискорень і вібрації.
- інклінометри - датчики нахилу.
- датчики переміщення - механічні, лазерні або GPS.

Побудова системи інструментального моніторингу має передувати проектуванню. Спостереження за опадами житлових будинків в експлуатаційний період необхідні для своєчасного виявлення і припинення розвитку вертикальних деформацій будівлі, викликаних різними причинами. Візуальні спостереження полягають в періодичному огляді будівлі, проводяться мінімум два рази на рік на початку і завершення опалювального сезону. Геодезичні спостереження проводять спеціалізовані організації і складаються в періодичному вимірі висотних положень нівелювальних марок по відношенню реперів і в зіставленні результатів вимірювань, проведених в різні періоди часу. Обґрунтуванням для проведення геодезичного моніторингу, тобто спостереження за опадами будівель високоточним нівелюванням, є нормативні документи. Проте рішення задач на кожному

етапі взаємопов'язане - як запроектовано і побудовано будівлю, такі умови і проблеми його експлуатації.

Так, наприклад, згідно з чинними нормативними документами [3] до складу геодезичних робіт, виконуваних на будівельному майданчику, входять геодезичні вимірювання деформацій основ, конструкцій будівель і їх частин, якщо це передбачено проектною документацією, встановлено авторським наглядом або органами державного нагляду. Методи і вимоги до точності геодезичних вимірювань деформацій основ будинків приймаються по ГОСТ 24846-84. Створення геодезичної розбивочної основи для будівництва і геодезичні вимірювання деформацій основ, конструкцій будівель і їх частин в процесі будівництва є обов'язком замовника. Виробництво геодезичних робіт, в процесі будівництва, геодезичний контроль точності геометричних параметрів будівель і виконавчі зйомки входять в обов'язки підрядника. Такі дослідження виконуються за спеціальним технічним завданням, яке складається проектною організацією виходячи з особливостей конструкцій будівлі. Вимірювання деформацій підстав фундаментів споруджуваних будинків і споруд проводять протягом усього періоду будівництва і в період експлуатації до досягнення умовної стабілізації деформацій, яка встановлюється проектною або експлуатуючою організацією. Вимірювання деформацій підстав фундаментів будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації проводять в разі появи неприпустимих тріщин, розкриття швів, а також різкої зміни умов роботи будівлі або споруди. За ГОСТ 24846-84 похибка вимірювань не повинна перевищувати 2 мм, що відповідає другому класу точності вимірювань. Як геодезичних знаків, що застосовуються для вимірювання осідання і деформацій споруд методом нівелювання, служать марки і репера. Для забезпечення точності вимірювань вертикальних деформація в експлуатаційний період будівлі повинні бути встановлені три глибинних репера, які розміщують поза зоною поширення тиску від будівлі або споруди. Репер - геодезичний знак, висотне положення якого є практично незмінним протягом усього часу вимірювання

осад. Деформаційні марки, для визначення вертикальних переміщень, встановлюються в нижній частині несучих конструкцій. Марки мають у своєму розпорядженні по всьому периметру будівлі, всередині його, в тому числі на кутах, на стиках будівельних блоків, по обидва боки осадового або температурного шва, в місцях примикання поздовжніх і поперечних стін, на поперечних стінах в місцях перетину їх з поздовжньою віссю, на несучих колонах, навколо зон з великими динамічними навантаженнями. Марка - геодезичний знак, нерухомо закріплений на конструкції будівлі, який змінює своє висотне положення внаслідок осідання фундаменту. Точки спостереження (осадові марки) закладаються в процесі будівництва. Способи установки осадових марок різні. У цегляній кладці вибивається гніздо на глибину до 150 мм, що заповнюється цементним розчином, в розчин вводиться сталевий куточок ребром вгору. На сталевих колонах куточок приварюється до стовбура колони. На залізобетонних колонах розкривається робоча арматура і до неї приварюється куточок. На палі встановлюється сталевий анкер з приварений до нього реперною головкою, для постановки на неї п'яти нівелірної рейки. Як осадових марок, що встановлюються в експлуатаційний період (як один з варіантів) можуть бути використані сталеві дюбелі [4].

Такі параметри як навантаження, в тому числі сейсмічні дії та вітрове навантаження (при перевищенні допустимого навантаження будівля може зруйнуватися), поява тріщин, порушення взаємозв'язку між елементами, впливають на стан несучих конструкцій і об'єкта в цілому [5].

Моніторинг інженерних конструкцій повинен володіти функціоналом для контролю напружено-деформаційного стану, зіставлення отриманих параметрів стану контрольованих конструкцій з еталонними параметрами, визначеними в проекті, або нормативних документах, звіт (висновок) про поточний технічний стан об'єкта моніторингу та прогнозу по зміні технічного стану на найближчий період, забезпечення безпечного функціонування інженерних конструкцій при зведенні будинків і споруд, а також в ході їх

експлуатації прийняття в разі необхідності своєчасних і адекватних заходів щодо посилення несучих конструкцій [5].

Призначенням системи моніторингу інженерних конструкцій є безпечна експлуатація будівель і споруд шляхом цілодобового моніторингу та реєстрації змін стану фундаменту, стін, несучих стінових панелей, балок перекриття та інших конструктивних елементів об'єкта, які сприймають основні навантаження: вага конструкцій, тиск вітру, вага снігу, людей, що знаходяться в будівлі, обладнання, тиск ґрунту на підземні частини будівлі і т. п., цілодобовий контроль деформаційних процесів шляхом отримання об'єктивної і достовірної інформації від системи, як на етапі будівництва, так і під час експлуатації об'єктів спостереження, оперативне виявлення відхилень параметрів будівельних конструкцій і вузлів від розрахункових значень на ранній стадії їх виникнення та вжиття необхідних заходів, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям [5].

Моніторинг стану будівельних конструкцій, будівель і споруд проводять з метою забезпечення їх безпечного функціонування. Результати моніторингу є основою для забезпечення належної експлуатації об'єкта.

Системи моніторингу також встановлюється на мости, з метою виявляти дефекти, фіксувати динаміку розвитку дефектів і зміни основних параметрів елементів конструкції, здійснювати збір, зберігання і аналіз даних, прогнозувати залишковий ресурс [5]. У трубопроводах, системи моніторингу використовуються для стеження за цілісністю. До основних цілей систем контролю трубопроводів відносяться:

- 1) швидке виявлення виникнення витoku або пошкодження конструкції трубопроводу;
- 2) оповіщення обслуговуючого персоналу про проблему і її характер;
- 3) надання максимально точної інформації про характер і координатах виниклого дефекту [5].

При новому будівництві або спостереженні за вже існуючими будівлями застосовують геодезичний моніторинг. Він полягає у проведенні

спостереження за просіданням фундаментів споруджуваних або вже побудованих будівель, а також будівель, що знаходяться в зоні будівництва. Цей вид моніторингу включає в себе геодезичні спостереження за вертикальними зміщеннями (опадками) будівель і споруд. Геодезичний моніторинг висотних будівель і споруд можливий також методом супутникової геодезії із застосуванням системи навігації GPS.

За допомогою лазерного сканера можливо визначати форми, розміри і положення будівельних об'єктів за їх фотографічним зображенням. Застосування лазерного сканера при моніторингу будівельних конструкцій і споруд є сьогодні перспективним напрямком.

Представляти зображення дефектів у цифровому вигляді, відстежувати динаміку їх розвитку в часі і просторі з подальшою комп'ютерною обробкою отриманих результатів дозволяє метод фотофіксації дефектів. Цифрове зображення зафіксованого дефекту може бути багаторазово перетворено, піддано масштабуванню і виведено на друк. Використовуючи накопичену систему у вигляді графіків, таблиць і кольорових фотографічних зображень, можна одержати реальну й наочну картину видимих змін дефектів в конструкціях в процесі тривалої експлуатації будівель .

2.1. Огляд датчиків систем моніторингу

У процесі контролю технічного стану конструкцій широко впроваджується моніторинг напружено-деформованого стану, який включає в себе оцінку деформації чи інших параметрів матеріалу, викликаних механічною напругою в об'єкті контролю [6].

1.2.1. Категорії датчиків деформації

Існують різні способи виміру деформації, які можна поділити на:

1. Оптичні. Засновані на вимірюванні малих зміщень поверхні, які реєструються, наприклад, інтерференційними методами, методами муарових візерунків та ін.

2. Пневматичні. Засновані на вимірюванні тиску стисненого повітря в соплі, що прилягає до поверхні досліджуваної деталі.

3. Акустичні. Засновані на вимірюванні змін акустичних параметрів матеріалу (швидкість звуку, акустичний опір, загасання) при дії навантажень. Ці зміни можуть бути виміряні п'єзоелектричними датчиками.

4. Електричні. Використовують зміну електричних параметрів матеріалу чутливого елемента тензодатчика при дії навантажень, як правило, зміни електричного опору або генеруючі напруги при деформаціях (п'єзоелектричні). Недолік останніх – непридатність для вимірювання статичних деформацій, але їм властива висока чутливість.

5. Рентгенівські. Засновані на вимірюванні міжатомних відстаней у кристалічній решітці матеріалу досліджуваного об'єкта

Датчик деформації перетворює величину деформації в електричний сигнал. Його можна використовувати не тільки за прямим призначенням, але й для вимірювання різних параметрів, та у багатьох інших датчиках, як проміжний елемент.

1.2.2. Акселерометр

Акселерометр (рис. 1.1) в системі моніторингу призначений для вимірювання віброприскорення. Система на базі акселерометра дозволяє

визначати власну частоту коливання об'єкта.

Власна частота об'єкта змінюється, якщо з'являється навантаження, в тому числі сейсмічні дії та вітрове навантаження (при перевищенні допустимого навантаження будівля може зруйнуватися), з'являються тріщини, порушуються взаємозв'язку між елементами.



Рис. 1.1. Акселерометр [7]

До основних переваг акселерометрів відносяться:

- 1) Мініатюрність;
- 2) Висока технологічність;
- 3) Висока функціональність;
- 4) Надійність і точність показань;
- 5) Стійкість до впливу зовнішніх факторів, таких як перепади температур, вологості, тиску, а також вібрація, удари, перешкоди і т.п.;
- 6) Низька вартість у порівнянні з пристроями, побудованими без застосування інтегральної технології [8].

1.2.3. Інклінометр

Інклінометри використовуються для створення ефективних систем безпеки. Крім того, з допомогою сучасного інклінометра відстежують процеси в гірничо-і нафтовидобувних галузях. Інклінометр можна зустріти на будівельних майданчиках. З його допомогою здійснюють контроль за станом архітектурних споруд, мостів і трубопроводів [9]. Класичним прикладом служить використання інклінометрів для установки на несучих колонах, опорних стовпах.

Призначення:

- контроль відхилення об'єкта від вертикалі в системах стабілізації кутового положення;
- реєстрація кутових переміщень об'єкта моніторингу: платформ, підстав, фундаментів, опор, ферм і ригелів, антено-щоглових споруд [5].

Безперечна перевага сучасного інклінометра полягає в інтегрованості в інше обладнання. Наприклад, гіроскопічну модель інклінометра застосовують у складі каротажних станцій. Це відкриває перед фахівцями нові можливості досліджувати вертикальні, похилі, обсажені та інші види свердловин [9].

Такі переваги, як висока точність, невеликі розміри, простота установки на об'єктах зумовили широкий діапазон їх застосування. Це і контроль за

вертикальним становищем висотних споруд, точне визначення напрямку буріння нафтових, газових та інших свердловин, визначення ухилу автомобільних доріг, залізничних колій, штреків в шахтах, крену кораблів, автомобілів, будівельних кранів і екскаваторів, вимір деформаційного прогину мостів, опорних балок і т.п.

Випускаються не тільки прості, але і інтелектуальні інклінометри з вбудованими мікропроцесорами, які виконують досить широкий набір функцій. Це можуть бути одно- і двокоординатні інклінометри з цифровим інтерфейсом, з можливістю автоматичного управління запобіжними механізмами, з можливістю завдання користувачем критичних значень кутів нахилу, з видачею попереджувальних сигналів і т.п. [10].

1.2.4. Датчики тиску

Датчики тиску застосовуються для вимірювання тиску. Класичним прикладом служить використання в фундаментній плиті або ростверку опори. Правильним є установка датчика в процесі заливки фундаменту, а не після. Інформація від датчика тиску дає уявлення про штатних навантаженнях на точку прикладання сили. При будь-яких змінах можна отримати графік значень відхилення параметрів від нормальних. Пневматичний або датчик тиску складається з первинного перетворювача тиску, у склад якого входить чутливий елемент з приймачем тиску, схема вторинної обробки та пристрій виводу, розміщені у корпусі. В таких датчиках створене ними зусилля, яке в свою чергу, через передавальні механізми переходить в кутове або лінійне переміщення стрілки на шкалі приладу, або деформація пружних чутливих елементів визначає тиск. На рис. 1.2 зображено датчик тиску Сапфір-22МТ [6,27].



Рис. 1.2. Датчик тиску
Сапфір-22MT

Основна відмінність даних датчиків є точність, з якою прилад реєструє тиск, яка залежить від принципу перетворення тиску в електричний сигнал [6,27].

Бувають різні датчики, які можуть використовуватися в будь-яких галузях: атомній, фармацевтичній, металургійної та інших.

1.2.5. Тахеометр

Тахеометр є приладом для організації безперервного автоматизованого моніторингу інженерних конструкцій будівель і споруд.

Геодезичний прилад, призначений для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів, довжин ліній і перевищень відноситься до класу неповторових теодолітів і використовується для визначення координат і висот точок місцевості при топографічній зйомці місцевості, при розбивочних роботах, винесення на місцевість висот і координат проектних точок, в основному непрямыми методами вимірювань: прямі і зворотні зарубки, тригонометричним нівелюванням і т. д.

Діапазон вимірювання відстаней залежить також від режиму роботи тахеометра: відбивний або безвідбивний. Дальність вимірювання в безвідбивному режимі безпосередньо залежить від властивостей поверхні на яку проводиться вимірювання. Дальність вимірювань на світлу гладку поверхню (кахельна плитка штукатурка, та ін.) в кілька разів перевищує максимально можливу відстань, виміряний на темну поверхню. Максимальна дальність лінійних вимірювань для режиму з відбивачем (призмою) - до 5 кілометрів (при декількох призмах - ще далі); для безвідбивного режиму - до 1 кілометра. Моделі електронних тахеометрів, які мають безвідбивний

режим, можуть вимірювати відстані практично до будь-якої поверхні, але слід з обережністю ставитися до результатів вимірювань, проведених крізь гілки, листя та інші подібні перешкоди, так як невідомо, від чого саме відіб'ється промінь, і, відповідно, відстань до чого він виміряє [11].

Існують моделі тахеометрів, що володіють далекоміром, поєднаним із системою фокусування зорової труби. Переваги таких тахеометрів полягає в тому, що вимірювання відстаней виробляється саме на той об'єкт, на який в даний момент спрямована зорова труба приладу.

Точність лінійних вимірювань в безвідбивному режимі - 2 мм +2 мм на кілометр.

Більшість сучасних тахеометрів обладнані обчислювальним і запам'ятовуючим пристроями (картами пам'яті), що дозволяють зберігати виміряні або проектні дані, обчислювати координати точок, недоступних для прямих вимірювань, за непрямыми спостереженнями, і ін. Деякі сучасні моделі додатково оснащені системою GPS (наприклад, Leica Smart Station) .

Програмне забезпечення дозволяє перетворити інструмент в міні-комп'ютер, який здатний на виконання будь-яких геодезичних робіт, основними з яких є [11]:

- горизонтальна і вертикальна зйомка;
- розбивка будівельних осей;
- винесення в натуру ділянок, дуги доріг;
- обчислення площ і обсягів земляних робіт;
- архітектурні проміри;
- визначення недоступних відстаней і багато іншого.

Для автоматизації польових вимірювань при виробництві топографічної зйомки та інших видів інженерно-геодезичних робіт створені високоточні електронні тахеометри. Електронний тахеометр містить кутомірну частину, сконструйовану на базі кодового теодоліта, світлодальноміру і вбудовану ЕОМ. За допомогою кутомірної частини визначаються горизонтальні і

вертикальні кути, світлодальному - обчислюються відстані, а ЕОМ вирішує різні геодезичні задачі, забезпечує управління приладом, контроль результатів вимірювань і їх зберігання.

Конструктивні елементи сучасного електронного тахеометра показані на рисунку 1.3 [11].

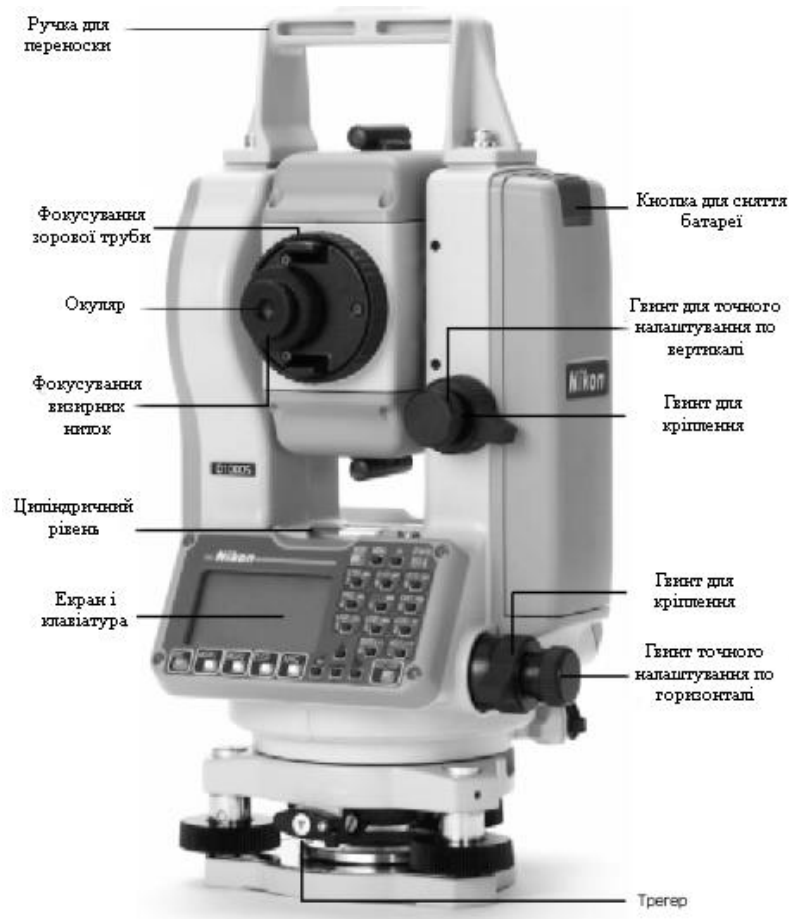


Рис. 1.3. Електронний тахеометр

До високоточним сучасним і високопродуктивним геодезичним засобам вимірювань відноситься нове покоління приладів, що дозволяють виконувати всі вимірювання в автоматизованому режимі. Такі вимірювальні прилади оснащені вбудованими обчислювальними засобами і пристроями, що запам'ятовують, що створюють можливість реєстрації і зберігання результатів вимірювань, подальше їх використання на ЕОМ для обробки. Застосування ЕОМ п'ятого покоління припускає інтелектуалізацію комп'ютерів, та інше. Можливість роботи з ними непрофесійного користувача природною мовою, в тому числі в мовній формі.[11].

1.2.6. Тензодатчик

Основний первинний пристрій, який перетворює фізичну величину в нормований електричний сигнал. При розтязі або стисненні чутливих елементів тензорезистора змінюється їх довжина та поперечний переріз, що в свою чергу, збільшує та зменшує опір відповідно. Тензодатчик приведено на рис. 1.4 [12,28].



Рисунок 1.4. Тензодатчик

Види тензодатчиків:

- прилади для вимірювання навантаження і сили (динамометри);
- вимірювачі тиску;
- моделі, що фіксує прискорення;
- пристрої для контролю переміщення;
- тензодатчики крутного моменту для автомобільних і верстатних двигунів.

Тензодатчики класифікуються не тільки за своєю формою, але і за конструктивними особливостями. Конструкція приладу залежить від типу чутливого елемента. Для контролю деформації використовуються наступні типи контактів: фольгові, плівкові та дротові.

Індикатор з фольговим елементом використовується, як клейкий тензодатчик. Це дуже зручна система, яка являє собою фольгових стрічку, товщиною до 12 мкм. Частина плівки має щільну форму, а частина – решітчасту. Дана модель відрізняється від інших тим, що можна припаювати додаткові контакти, до того ж вони витримують низькі температури [13].

Плівкові є аналогом фольгових, за винятком матеріалу, з якого виготовлені. Виробники виготовляють такі моделі з тензочутливих плівок з особливим напиленням, яке збільшує чутливість системи. Такі вимірювальні вузли зручно використовувати при необхідності виміряти динамічні навантаження. Виробництво плівок виконується з таких матеріалів, як титан, вісмут, германій [13].

Дротові здатні виміряти навантаження від декількох сотих грама до цілих тон (скажімо, ваговій бункер і інші). Їх називають одноточкові, так як на відміну від плівкових і фольгових моделей, вони вимірюють в одній точці, а не площі. Така конструкція (рис.1.5 [13]) дозволяє використовувати дротяні тензодатчики для вимірювання деформації стиску і розтягування.

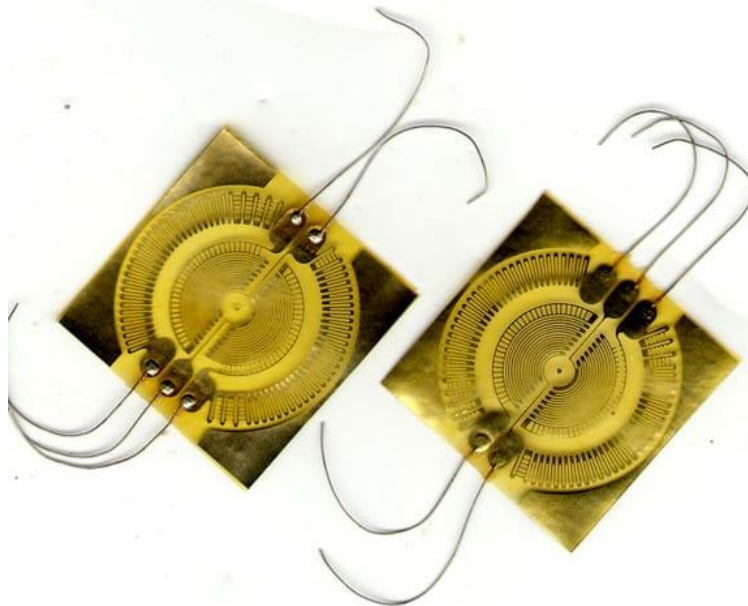


Рис. 1.5. Конструкція тензодатчика

Принцип роботи. Конструктивно прилад являє собою тензорезистор з контактним елементом. Він закріплений на верхній панелі пристрою, яка стикається з вимірюваним тілом. Принцип роботи будь-якого тензодатчика заснований на впливі на чутливий елемент певної деталі. Для включення датчика в мережу застосовується спеціальні електричні відводи, які підключаються до чутливої пластини. Завдяки цьому в контактному елементі спостерігається постійна напруга. Але, при роботі датчика на спеціальну підкладку встановлюється деталь. Її вага розриває ланцюг і утворюється

механічна деформація, яка за допомогою контрольних контактів перетворюється в електричний сигнал.

Вимірювальний міст тензодатчика дозволяє виміряти найменші навантаження, завдяки чому значно розширюється використання приладу. Мостова схема підключення тензометричного датчика заснована на законі Ома, при якому якщо всі опори мають рівне значення, то струм, що проходить через резистори, також буде мати однакове значення. Тут вплив із зовні прийнято називати «зовнішнім фактором», а перетворення сигналу - «внутрішнім». Тоді принцип дії заснований на аналізі зовнішнього фактора за допомогою внутрішнього.

Цей вимірювальний прилад має надзвичайно високою точністю аналізу. Чутливість робочих елементів допускає похибка не більше 0,02%, що є досить високим показником. Але деякі пристрої виконуються з ще більшим класом точності. Робота таких моделей заснована на вимірі сили впливу на контакти. Електричний перетворений сигнал є прямо пропорційною величиною силі тиску.

До основних переваг належать: висока точність вимірювання, сприйняття всіх деформацій зовнішнього волокна деталі, реагування на стиск або розтяг, невеликі розміри дозволяють використовувати такі датчики практично в будь-яких вимірювальних приладах (безінерційні), можливе розміщення у важкодоступному місці, не спотворюють інформацію, сумісність з вимірами напруги, підходять для вимірювання статичних і динамічних напружень, при цьому, не спотворюють отримані дані. Датчики можуть включатися в мостові та потенціометричні схеми для вимірювання різноманітних деформацій. Маючи такі переваги, тензорезистори набули значного поширення.

Але, у тензодатчиків є і певні недоліки. Будь-який перетворювач такого типу схильний до зниження чутливості при перепадах температури. Для найбільш точного вимірювання потрібно проводити досліді тільки при кімнатній температурі і вологості не більше 30% [13].

1.2.7. П'єзоелектричний датчик

В основі роботи п'єзоелектричного датчика є п'єзоелектричний ефект. Коли до п'єзоелектрику прикладається механічне напруження, він поляризується в зазначеному напрямку, і між його гранями з'являється електрична різниця потенціалів. Величина механічної напруги, прикладеного до кристалу, прямо пов'язана з величиною його деформації, а, отже, і з різницею потенціалів між його гранями. Це дозволяє по вимірній величині напруги дізнатися величину діючої на п'єзокристал сили. П'єзоелектричний датчик використовується для виміру швидкозмінного тиску, якщо тиск змінюється не достатньо швидко, то зростає похибка перетворення через перехід електричного заряду з пластин до корпусу. Якщо п'єзоелектрик деформувати, і залишити його в цьому стані, то напруга між обкладками зменшиться через осідання на них іонів повітря і струму, що протік через систему реєстрації. Таким чином, при незмінній деформації п'єзоелектрика напруга між обкладками буде зменшуватися, поки не досягне нуля. Тому п'єзодатчик (рис. 1.6) зручний у використанні тільки при вимірі відносно швидких деформацій [6].



Рис. 1.6. П'єзоелектричний датчик пристроях, тощо [6].

Високі динамічні характеристики та здатність сприймати коливання тиску з частотою від десятків Гц до десятків МГц – це є основними перевагами п'єзоелектричних датчиків. Застосовуються при вимірах вібрацій і деформацій, а також тензометричних вимірах, у вагових і сортувальних (по вазі)

1.2.8. Магнітопружний датчик

Магнітопружний датчик або магнітострикційний датчик (рис. 1.7). Це вимірювальний перетворювач механічних зусиль (деформацій) або тиску в електричний сигнал. Дія магнітопружного датчика заснована на використанні залежності магнітних характеристик таких матеріалів, як пермалой чи інвар, від механічної напруги в них. Робочий елемент магнітопружного датчика — магнітопровід, на якому розміщено одна або декілька обмоток, що включаються в міст вимірник. Магнітопровід магнітопружного датчика укріплюють на поверхні деталі (або споруди) у напрямі зусиль, що діють, або деформацій. Зміни магнітних характеристик, зокрема магнітній проникності матеріалу магнітопровода, виявляються в зміні індуктивності або взаємоіндуктивності обмоток. Магнітопружний датчик найдоцільніше застосовувати при вимірах малих деформацій (як постійних, так і швидкоплинних) в твердих тілах, а також вимірах тиску рідин і газів, коли потрібна висока чутливість вимірів при відносно малої їх точності [14].



Рис. 1.7. Магнітострикційний датчик з цифровим виходом [15]

1.2.9 Волоконно-оптичні датчики

Ядром технології волоконно-оптичних вимірювань є оптичне волокно - тонка нитка зі скла, яка пропускає світло через свою серцевину. Оптичне волокно складається з трьох основних компонентів: сердечника, оболонки і покриття (рис.1.8).

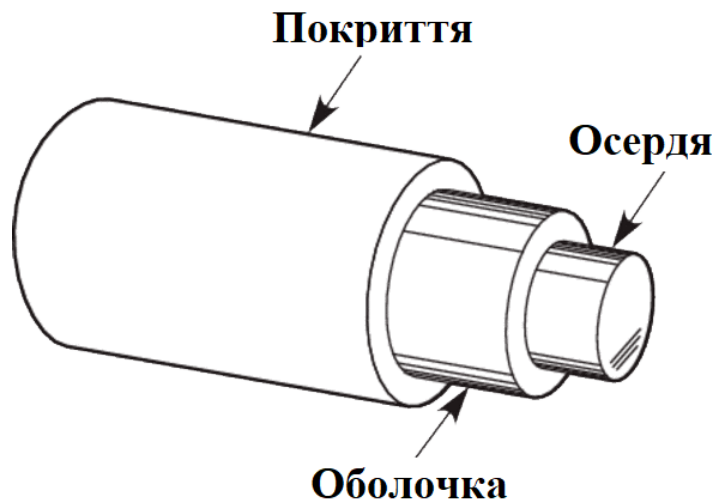


Рис. 1.8. Поперечний переріз оптичного волокна

Оболонка відображає розсіяне світло назад в активну зону, забезпечуючи проходження світла через ядро з мінімальними втратами. Це досягається за допомогою більш високого показника заломлення в серцевині по відношенню до оболонки, в результаті чого відбувається повне внутрішнє відбиття світла. Зовнішнє покриття служить буфером для захисту волокна від зовнішніх впливів і фізичних ушкоджень. Воно може включати в себе кілька шарів в залежності від необхідного захисту.

Оптичне волокно буває одного з двох типів: одномодове, в якому розповсюджується тільки одна мода (тип розподілу переданого електромагнітного поля), і багатомодове — з передачею безлічі (близько сотні) мод. Конструктивно ці типи волокон розрізняються тільки діаметром осердя — світлопровідній частині, усередині якої коефіцієнт заломлення трохи вищий, ніж в периферійній частині — оболонці. Багатомодові волокна мають великий (приблизно 50 мкм) діаметр осердя, що полегшує їх з'єднання один з одним. Але оскільки групова швидкість світла для кожної моди різна,

то при передачі вузького світлового імпульсу відбувається його розширення (збільшення дисперсії). В порівнянні з багатомодовими у одномодових волокон переваги і недоліки міняються місцями: дисперсія зменшується, але малий (5...10 мкм) діаметр осердя значно утруднює з'єднання волокон цього типу і введення в них світлового променя лазера[16, 17, 18].

Внаслідок цього одномодові оптичні волокна знайшли переважне застосування в лініях зв'язку, що вимагають високої швидкості передачі інформації (лінії верхнього рангу в ієрархічній структурі ліній зв'язку), а багатомодові найчастіше використовуються в лініях зв'язку з порівняно невисокою швидкістю передачі інформації. Є так звані когерентні волоконно-оптичні лінії зв'язку, де придатні тільки одномодові волокна. У багатомодовому оптичному волокні когерентність світлових хвиль, що приймаються, падає, тому його використання в когерентних лініях зв'язку непрактичне, що і зумовило застосування в подібних лініях тільки одномодових оптичних волокон. Навпаки, хоча при використуванні оптичних волокон для датчиків вищезгадані чинники теж мають місце, але у багатьох випадках їх роль вже інша. Зокрема, при використуванні оптичних волокон для когерентних вимірювань, коли з цих волокон формується інтерферометр, важливою перевагою одномодових волокон є можливість передачі інформації про фазу оптичної хвилі, що нездійснено за допомогою багатомодових волокон. Отже, в даному випадку необхідне тільки одномодове оптичне волокно, як і в когерентних лініях зв'язку. Проте, на практиці застосування одномодового оптичного волокна при вимірюванні нетипове через невелику його дисперсію. В сенсорній оптоелектроніці, за винятком датчиків-інтерферометрів, використовуються багатомодові оптичні волокна. Ця обставина пояснюється ще і тим, що в датчиках довжина використовуваних оптичних волокон значно менша, ніж в системах оптичного зв'язку [6,16, 17,].

Необхідно відзначити загальні переваги оптичних волокон:

- широкосмугова (передбачається до декількох десятків терагерц);

- малі втрати (мінімальні 0,154 дБ/км);
- малий (близько 125 мкм) діаметр;
- мала (приблизно 30 г) маса;
- еластичність (мінімальний радіус вигину 2 мм);
- механічна міцність (витримує навантаження на розрив приблизно 7 кг);
- відсутність взаємної інтерференції (перехресних перешкод типу відомих в телефонії "перехідних розмов");
- безіндукційність (практично відсутній вплив електромагнітної індукції, а отже, і негативні явища, пов'язані з грозовими розрядами, близькістю до лінії електропередачі, імпульсами струму в силовій мережі);
- вибухобезпечність (гарантується абсолютною нездатністю волокна бути причиною іскри);
- висока електроізоляційна міцність (наприклад, волокно завдовжки 20 см витримує напругу до 10000 В);
- висока корозійна стійкість, особливо до хімічних розчинників, масел, води [16].

У практиці використання волоконно-оптичних датчиків мають найбільше значення останні чотири властивості. Достатньо корисні і такі властивості, як еластичність, малі діаметр і маса. Широкосмуговість же і малі втрати значно підвищують можливості оптичних волокон, але далеко не завжди ці переваги усвідомлюються розробниками датчиків. Проте, з сучасної точки зору, у міру розширення функціональних можливостей волоконно-оптичних датчиків в найближчому майбутньому ця ситуація потроху виправиться.

У волоконно-оптичних датчиках оптичне волокно може бути застосоване просто як лінія передачі, а може грати роль найчутливішого елементу датчика. У останньому випадку використовуються чутливість

волокна до електричного поля (ефект Керра), магнітного поля (ефект Фарадея), до вібрації, температури, тиску, деформацій (наприклад, до вигину). Багато з цих ефектів в оптичних системах зв'язку оцінюється як недоліки, в датчиках же їх поява вважається швидше перевагою, яку слід розвивати і використовувати.

Сучасні волоконно-оптичні датчики дозволяють вимірювати майже все. Наприклад, тиск, температуру, відстань, положення в просторі, швидкість обертання, швидкість лінійного переміщення, прискорення, коливання, масу, звукові хвилі, рівень рідини, деформацію, коефіцієнт заломлення, електричне поле, електричний струм, магнітне поле, концентрацію газу, дозу радіаційного випромінювання, на використуванні пучків таких волокон ґрунтується вся техніка ендоскопії.

Якщо класифікувати волоконно-оптичні датчики з погляду застосування в них оптичного волокна, то, їх можна грубо розділити на датчики, в яких оптичне волокно використовується як лінія передачі, і датчики, в яких воно використовується, як чутливий елемент. У датчиках типу "лінії передачі" використовуються в основному багатомодові оптичні волокна, а в датчиках сенсорного типу найчастіше — одномодові [16].

Волоконно-оптичні датчики набувають все більшого поширення у сфері моніторингу та безпеки, так як вони позбавлені ряду істотних недоліків, властивих електричним аналогам. Основний принцип роботи полягає в тому, що світло проходячи через оптичне волокно від лазера або суперлюмінесцентного оптичного джерела, зазнає слабких змін своїх параметрів у волокні чи в одній або декількох бреггівських решітках, які оцінюються в схемі детектування [15].

Датчики 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 в порівнянні з дорогими аналогами. На рис. 1.9 зображено волоконно-оптичні датчики.

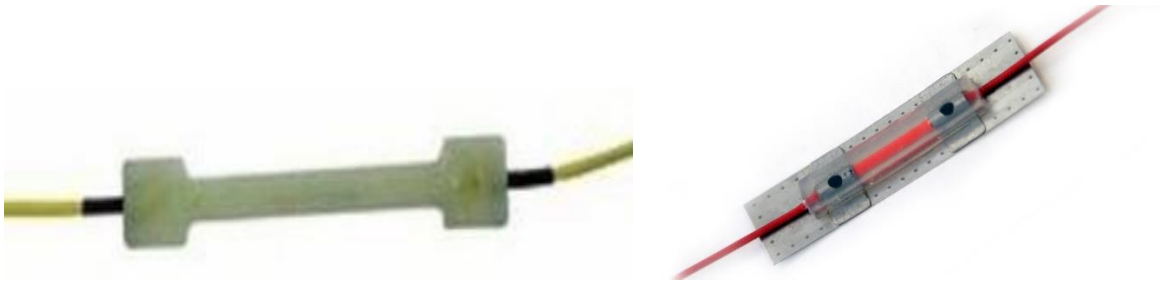


Рис. 1.9. Волоконно-оптичний датчик [19]

До недоліків належить непрактичне застосування багатомодових оптичних волокон в когерентних лініях зв'язку, через невелику швидкість передачі інформації [6].

Одним з найбільш часто використовуваних волоконно-оптичних датчиків є датчики на основі волоконно-бреггівських решіток (ВБР, англ. FBG - fiber Bragg grating). Решітки в цих датчиках відображають світловий сигнал, спектральна характеристика якого (довжина хвилі) зміщується разом зі зміною вимірюваного параметра (температурою і/або деформацією). При виготовленні решіток всередині сердечника створюється область з періодичною зміною показника заломлення, безпосередньо ця область і називається ВБР.

Коли широкосмугове світлове випромінювання проходить через бреггівські решітки, відбиття від кожного сегмента області зі змінним показником заломлення інтерферують тільки для конкретної довжини хвилі світла, званої довжиною хвилі Брегга (λ_b), описаної в рівнянні нижче. Це фактично призводить до того, що ВБР відбиває певні довжини хвиль (певну частоту) світла і пропускає всі інші.

$$\lambda_b = 2n\Lambda \quad (1.1)$$

У рівнянні (1.1), λ_b - бреггівська довжина хвилі, n - ефективний показник заломлення сердечника оптичного волокна, Λ - відстань між ґратами або

період решітки. На рис 1.10 [20] зображено конструкцію волоконної бреггівської решітки.

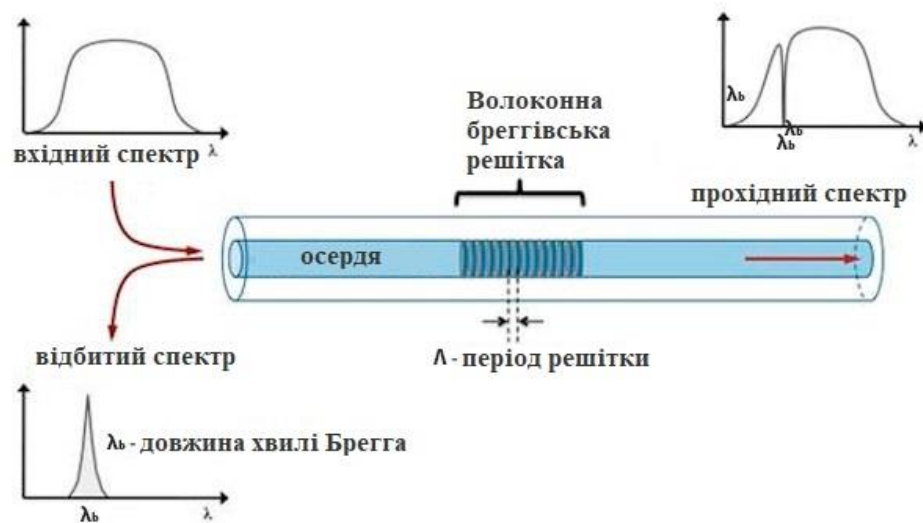


Рис 1.10. Конструкція волоконної бреггівської решітки

Знаючи, що бреггівськими довжина хвилі залежить від періоду решітки, можна виготовляти решітки з різними бреггівськими довжинами хвиль.

Оскільки ВБР реагує як на деформацію, так і на температури, то необхідно враховувати обидва ці ефекту і розрізняти їх між собою. Для вимірювання температури решітка не повинна відчувати деформацію. Для цього можна помістити ґрати всередину корпусу, щоб бути впевненим, що ґрати не буде піддаватися розтягування, стиснення, згинання або скручування. Коефіцієнт теплового розширення $\alpha\Lambda$ скла на практиці не приймається в розрахунок (зневажливо малий), таким чином, зміни в відбитому спектрі викликані впливом температури може бути описано зміною показника заломлення волокна n_p .

ВБР датчики деформації кілька більш складні, так, як і температура і деформація впливають на спектр відбитого сигналу. Для отримання коректних даних вимірювань деформації, необхідно компенсувати вплив температури на ВБР. Це можна зробити за допомогою установки ВБР датчика температури ВБР в тісному тепловому контакті з ВБР датчиком

деформації. Просте віднімання зсуву спектра, викликаного датчиком температури від зсуву спектра датчика деформації, видаляє другий доданок рівняння (2). Що в результаті дає значення деформації з температурною компенсацією.

Процес монтажу датчиків на основі ВБР дуже схожий на монтаж звичайних датчиків, так як ВБР датчики мають різне виконання (на підкладці, в корпусі і т.д.).

Переваги датчиків на основі ВБР. На даний момент більшість датчиків використовуваних в світі це електричні датчики (МЕМС, тензорезистори, струнні і т.д.). В датчиках на основі бреггівських решіток сигналом є світло, що проходить через оптичне волокно (замість електричного струму, що проходить по мідному дроту). Це кардинальна відмінність дозволяє ВБР датчикам подолати багато проблем характерні для електричних датчиків.

Оптичні волокна і датчики є непровідними, електрично пасивними і несприйнятливими до ЕМ-перешкод. Опитування за допомогою перебудованого лазера високої потужності дозволяє проводити вимірювання на великі відстані практично без втрати сигналу. Крім того, на відміну від електричного каналу вимірювальної системи, кожен оптичний канал може опитувати безліч датчиків ВБР (кожен канал є «гірляндою»), що значно зменшує розмір і складність такої системи вимірювання.

Оптичні вимірювальні системи ідеально підходять для застосування в умовах, де звичайні електричні датчики (тензорезисторні, струнні, терморезисторні і т.п.) виявилися невідповідними для використання через складні умови (великі відстані, ЕМ поля, вибухобезпечність і ін.). Так як монтаж і експлуатація оптичних датчиків аналогічні із застосуванням звичайних електричних датчиків, легко здійснити перехід на оптоволоконні рішення. Розуміння принципів роботи таких систем і переваг від їх використання може значно полегшити вирішення різних завдань в області вимірювань (наприклад, моніторинг конструкцій) [20].

Саме завдяки унікальним властивостям велика кількість сучасних сенсорних систем моніторингу технічного стану конструкцій засноване саме на волоконно-оптичних бреггівських датчиках - найбільш перспективних, надійних і зручних.

РОЗДІЛ 2.

МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ

2.1. Волоконно-оптична система моніторингу

Система моніторингу на основі волоконно-оптичних датчиків дозволяє реалізовувати на одному волокні до декількох десятків датчиків. В якості волоконно-оптичного датчика використовують оптичне волокно із встановленими по довжині волокна решітками Брега. Використовуючи волоконні решітки Брега, можна побудувати систему моніторингу, здатну вимірювати фізичні величини в реальному масштабі часу. Волоконно-оптичний датчик можна інтегрувати в структуру композитного матеріалу, тим самим з'являється можливість створення інтелектуальних композиційних матеріалів [21].

В процесі виробництва кожна решітка Брега встановлюється для певної довжини хвилі. Довжина хвилі є унікальним параметром, відповідним тільки цієї решітці. Це дозволяє забезпечити квазірозподілене зондування деформації, температури та інших величин, що вимірюються на одному волокні, пов'язуючи кожен ділянку спектра з конкретної просторово розташованою ВБР. Верхня межа числа решіток, які можуть бути розміщені по довжині волокна, в цьому випадку є функцією ширини вхідного спектра зондуючого сигналу і робочої довжини хвилі смуги пропускання, необхідної для кожного елемента (решітки). Таким чином, решітки можна мультиплексувати до декількох десятків і більше датчиків уздовж одного волокна, якщо накладення спектра сигналів кожної решітки не перевищує 0,1%. Існує велика різноманітність методів опитування решіток Брега, але найбільш поширеним є частотне і тимчасове розподіл сигналу. Частотний розподіл забезпечується застосуванням декількох фотодетекторів, що охоплюють весь спектр сигналу, відбитого від масиву датчиків, а тимчасове сканування реалізується за допомогою перебудованого фільтра, що забезпечує послідовне опитування решіток Брега [21].

2.2. Принцип роботи волоконно-оптичної системи

Пристрій реєстрації, який опитує волоконно-оптичні датчики (Інтеррогатор), в спрощеному вигляді складається з широкополосного джерела світла, спрямованого відгалужувача і фотодетектора, що фіксує довжину хвилі відбитого решітками світла, як показано на рис. 2.1.

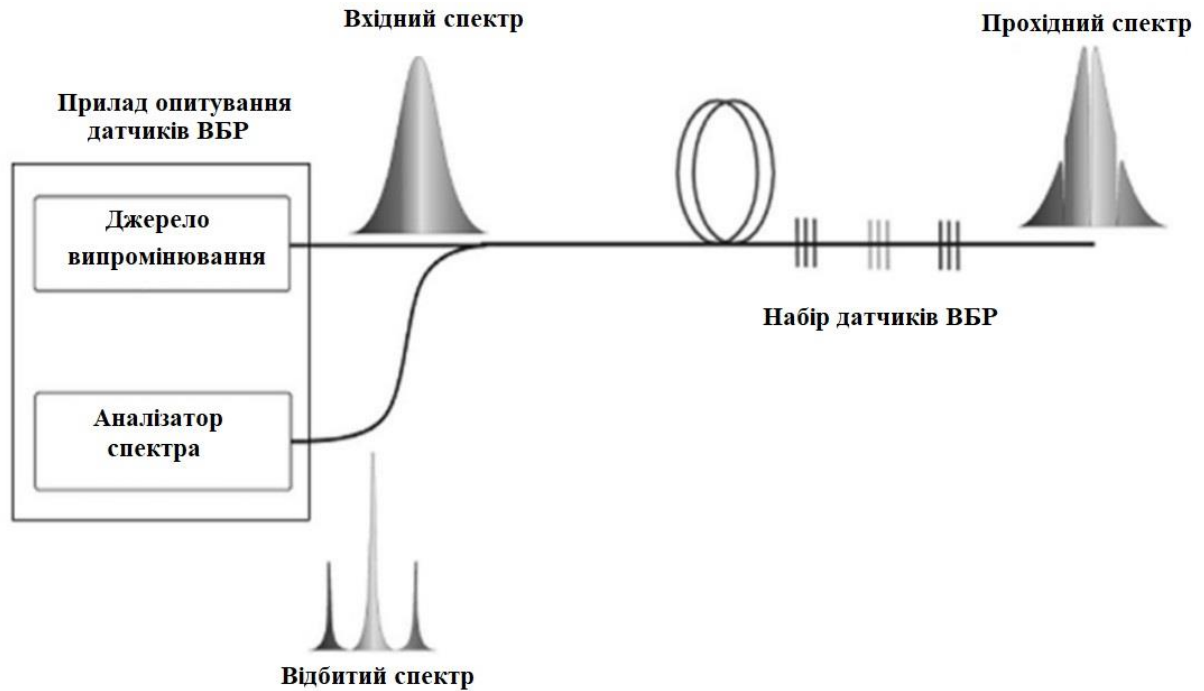


Рис.2.1. Спрощена схема системи [21]

В якості основної частини оптоволоконного датчика оптичне волокно зазвичай виготовляється з кварцового скла або полімерного матеріалу, який сам може діяти в якості чутливого елемента або переносити світло від джерела до модуляторні елементу. Коли відбувається деформація або зміна температури конструкції, встановлений на поверхні або вбудований в конструкцію оптоволоконний датчик буде розтягуватись або стискатись. Відповідно до зміни довжини оптичного волокна волоконно-оптичний датчик модулює світло і відображає оптичний сигнал назад в аналітичний блок для отримання відповідної фізичної величини структури [22].

Ширина смуги відбитого сигналу в більшості датчиків залежить від кроку решітки, зазвичай це від 0,05 до 0,3 нм. Вплив на решітку деформації температури або прискорення призводить до зміщення довжини хвилі Брегга,

яке може бути виявлено в відбитому спектрі сигналу. Так, для реєстрації зміни температури в $0,1^{\circ}\text{C}$ необхідно фіксувати зміну довжини хвилі Брегга в $0,001\text{ нм}$. Цю довжину хвилі можна досягти за допомогою використання лабораторного обладнання, такого як оптичний інтеррогатор з змінною частотою [21].

2.3. Моделювання волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток

Довжина хвилі оптичного випромінювання, відбитого бреггівськими решітками, залежить від ефективного показника заломлення і від періоду решітки. За наступною формулою визначається зміна довжини хвилі з урахуванням впливу температури і механічних напружень [23]:

$$\Delta\lambda_{BP} = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{enn}}{\partial l} + n_{enn} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{enn}}{\partial T} + n_{enn} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T, \quad (2.1)$$

де Λ - період решітки, n_{enn} - ефективний показник заломлення. Перший доданок в (2.1) дає значення зсуву довжини хвилі в залежності від деформації, друга складова – в залежності від температури. Залежність зсуву довжини хвилі відбитого випромінювання від деформації також може бути представлена в наступному вигляді [24]:

$$\Delta\lambda_{BP} = \lambda_{BP} \left(1 - \frac{n_{enn}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\right) \varepsilon_z, \quad (2.2)$$

де p_{11} і p_{12} – коефіцієнти Поккельса в тензорі оптичних напруг, ν - коефіцієнт Пуассона. Для типового оптичного волокна $p_{11}=0,113$, $p_{12}=0,252$, $\nu=0,16$ і $n_{enn}=1,4682$ та $\lambda_{BP}=1500\text{ нм}$.

Другий доданок виразу (2.1) відповідає залежності зміщення довжини хвилі від температури. Довжина хвилі випромінювання, відбитого від

бреггівських датчиків, змінюється залежно від температури через теплове розширення оптичного волокна (подовжується період бреггівської решітки), так як відбувається зміна механічної довжини решітки, а також зміна показника заломлення волокна в залежності від температури (змінює оптичну довжину решітки). Звідки випливає, що залежність зміщення довжини хвилі від температури може бути описана наступним виразом [24]:

$$\Delta\lambda_{BP} = \lambda_{BP}(\alpha_{\Lambda} + \alpha_n)\Delta T, \quad (2.3)$$

де α_{Λ} - температурний коефіцієнт лінійного розширення ($\alpha_{\Lambda} = 0,55 \cdot 10^{-6}$ для плавленого кварцу), α_n - термооптичний коефіцієнт ($\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6}$ для оптичного волокна з легованим германієм).

Для дослідження та моделювання волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток було обрано використовувати програмний пакет MatLab, у якому було реалізовано принцип роботи даних датчиків. Вхідний сигнал, який генерується джерелом випромінювання подається на бреггівський датчик по оптоволоконному світловоду, сигнал являє собою світловий промінь [25] із спектральною характеристикою, як показано на рис.2.2 [26]. Даний сигнал піддається Гаусівському нормальному розподілу [1].

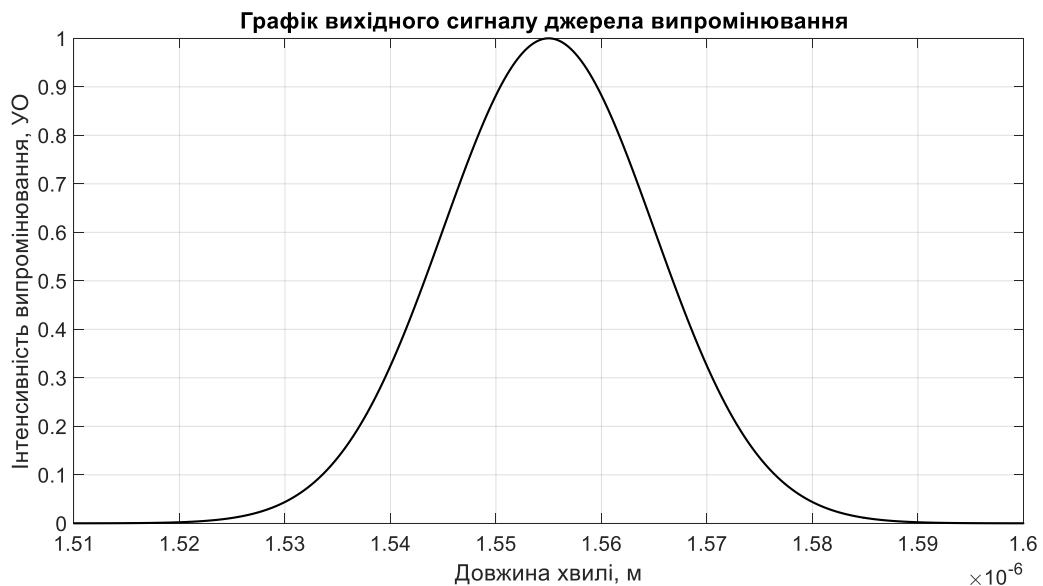


Рис.2.2. Модель вихідного сигналу джерела випромінювання

2.3.1. Моделювання системи на основі одного датчика ВБР без деформації та впливу температури

При пропусканні сигналу джерела випромінювання через бреггівський ВОД частина спектру проходить, а інша частина сигналу відбивається та фіксується спектральним аналізатором (детектором). Відбита частина сигналу характеризується Гаусівським нормальним розподілом і зображена на рис.2.3 [26].

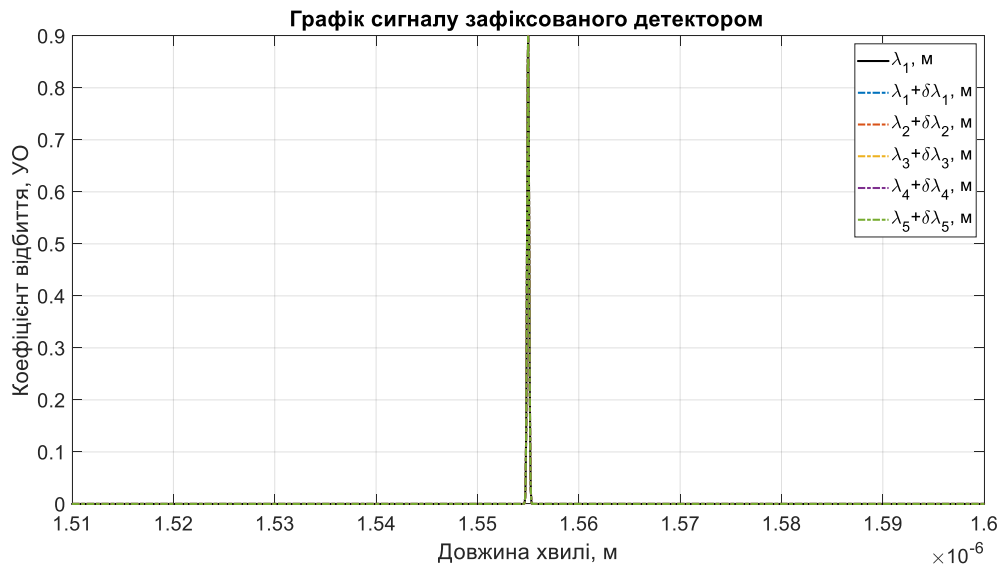


Рис. 2.3. Модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

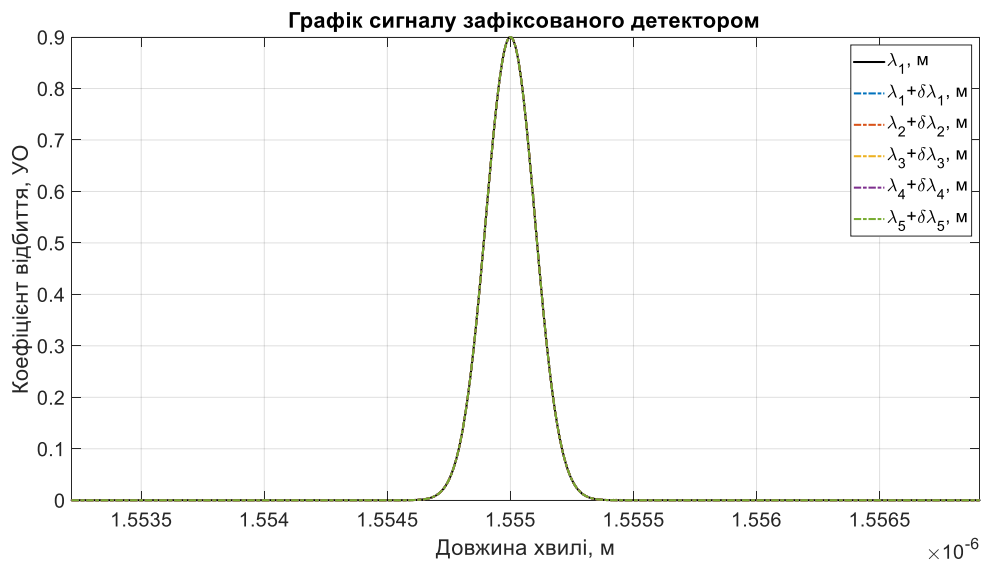


Рис. 2.4. Масштабована модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

Спектр, який пройшов через волоконну бреггівську решітку характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру (рис.2.2) та відбитого спектру (рис. 2). На рис.2.5 [26] представлений вихідний сигнал волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток. Графік представляє залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі при відсутньому параметрі деформації.

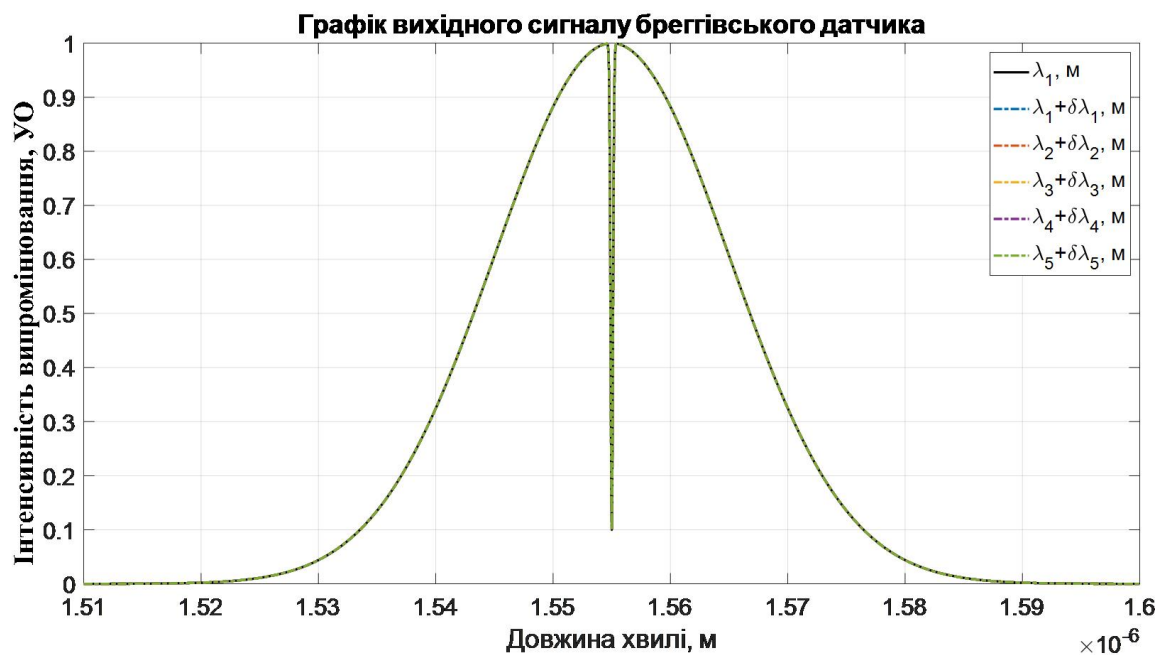


Рис. 2.5. Модель вихідного сигналу ВОД

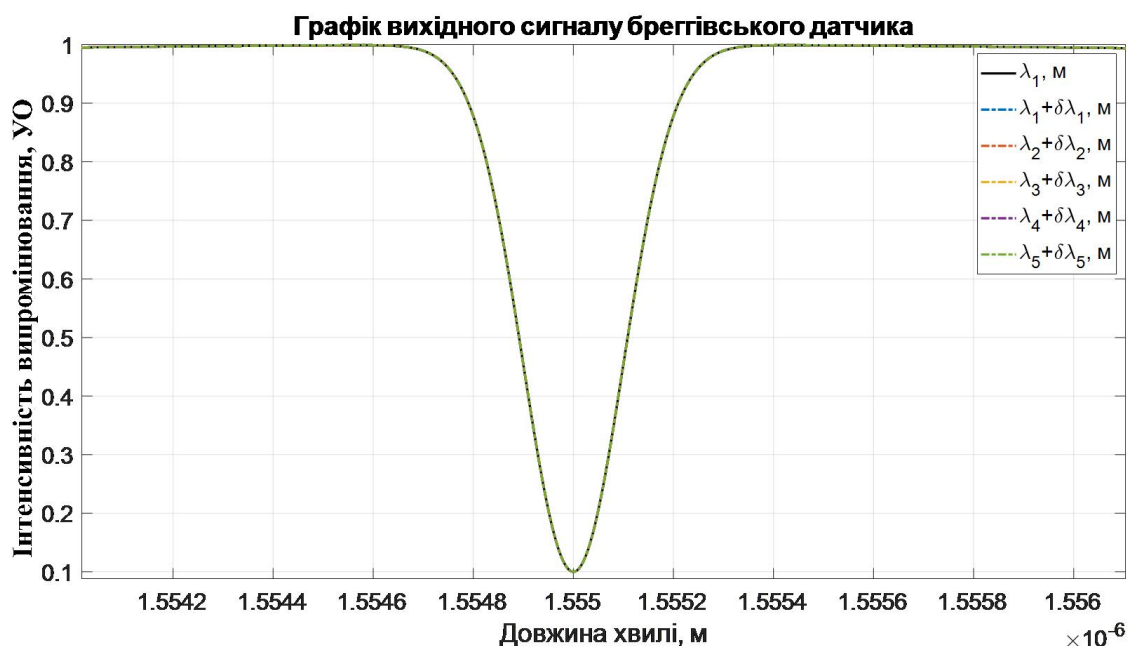


Рис. 2.6. Масштабована модель вихідного сигналу ВОД

2.3.2. Моделювання системи на основі одного датчика ВБР з деформацією та без впливу температури

Для дослідження характеристик датчика штучно задається деформація. Рівень деформації задаємо наступний:

$$\varepsilon = 15 \cdot 10^{-4} \quad (2.4)$$

При цьому вхідний сигнал, який генерується джерелом випромінювання подається на бреггівський датчик по оптоволоконному світоводу, сигнал являє собою світловий промінь із такою спектральною характеристикою, як показано на рис.2.7. Даний сигнал піддається Гаусівському нормальному розподілу.

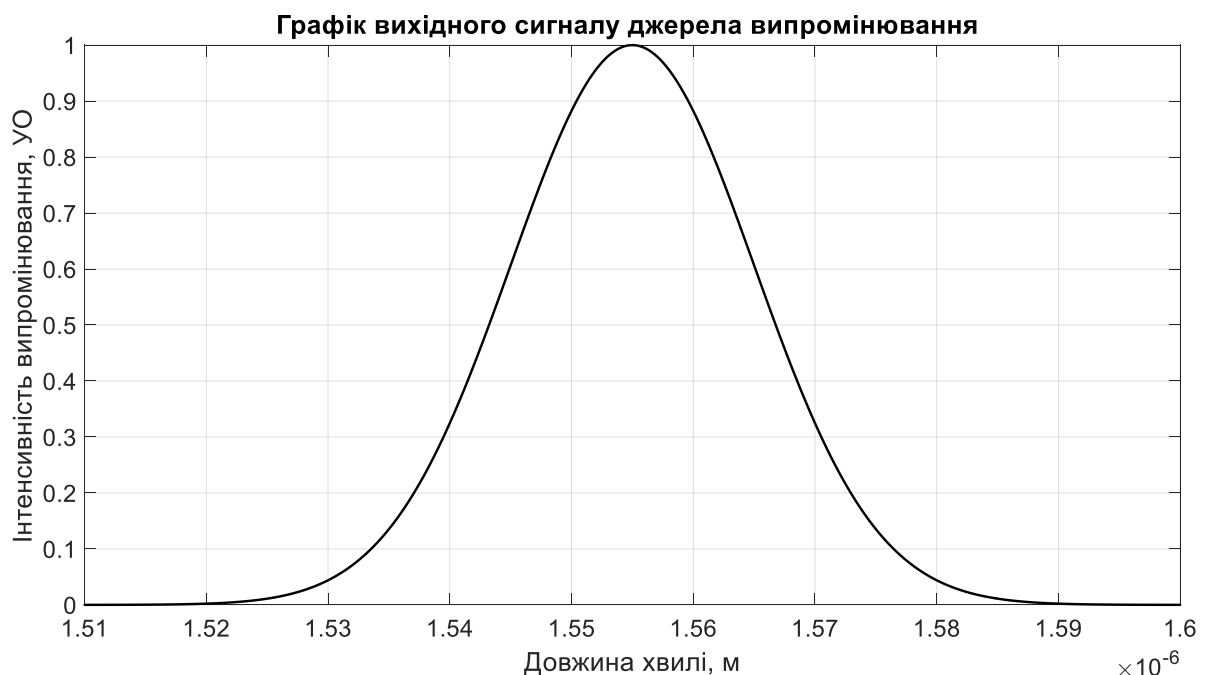


Рис. 2.7. Модель вихідного сигналу випромінювача

З врахуванням першого доданку формули (2.1) та з заданою $\Delta T = 0$ при пропусканні сигналу джерела випромінювання через бреггівський ВОД частина спектру проходить, а інша частина сигналу, що відбивається та фіксується спектральним аналізатором (детектором). При деформації пік відбитого

спектру зміщується відносно початкового значення при якому датчик знаходився у стані спокою. Величина зміщення характеризується зсувом по довжині хвилі λ та є наступною $\Delta\lambda = 1.995 \cdot 10^{-9}$ нм. Відбита частина сигналу характеризується Гаусівським нормальним розподілом і зображена на рис.2.8 [26].

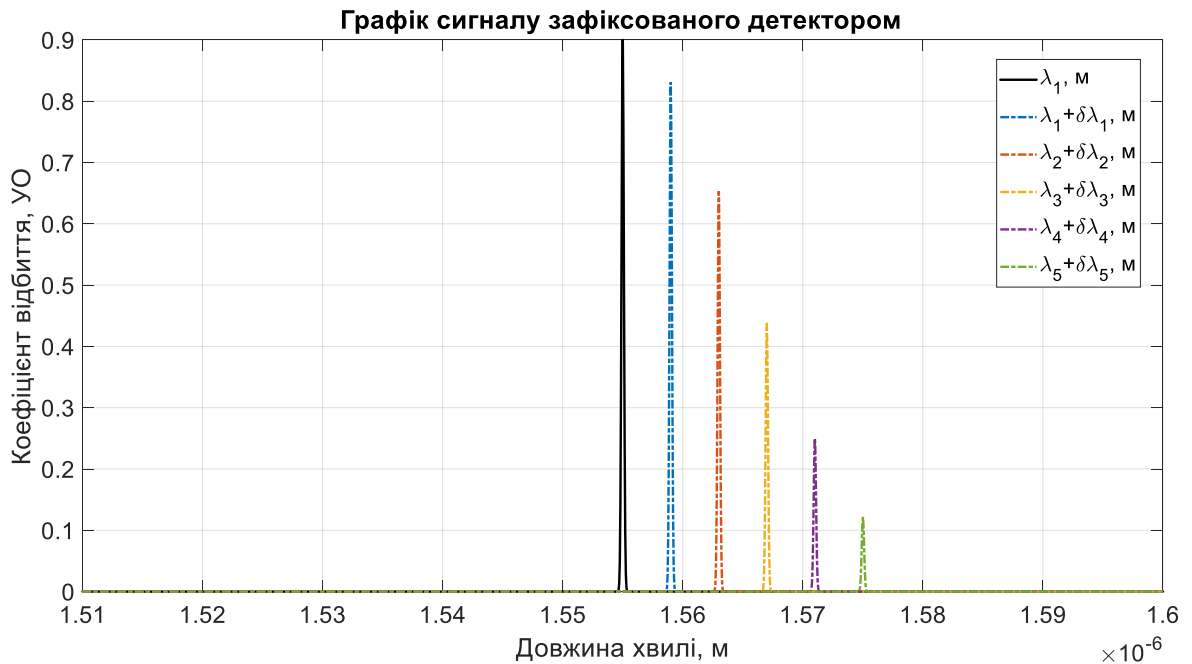


Рис. 2.8. Модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

Спектр, який пройшов через волоконну бреггівську решітку характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис.2.6 та відбитого спектру, який представлений на рис. 2.8. На рис.2.9 [26] представлений вихідний сигнал волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток. Графік представляє залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі при різних значеннях параметру деформації.

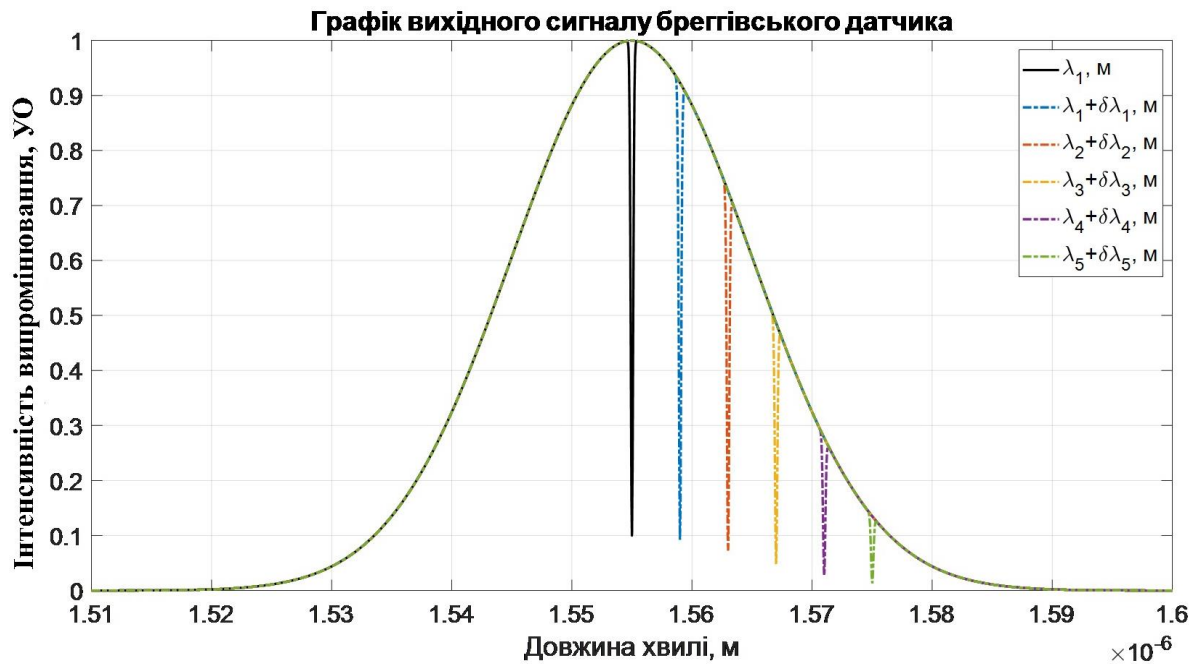


Рис. 2.9. Модель вихідного сигналу ВОД

2.3.3. Моделювання системи на основі одного датчика ВБР з деформацією та з впливом температури

Для дослідження характеристик датчика штучно задається деформація та температурна складова, відповідно формули (2.1). Рівень деформації та зміна температури задаються:

$$\Delta T = 24 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{F}, \quad \varepsilon = 15 \cdot 10^{-4} \quad (2.5)$$

На бреггівський датчик по оптоволонному світоводу подається вхідний сигнал, який піддається Гаусівському нормальному розподілу. Сигнал генерується джерелом випромінювання, і який являє собою світловий промінь з спектральною характеристикою, яка зображена на рис.2.10.

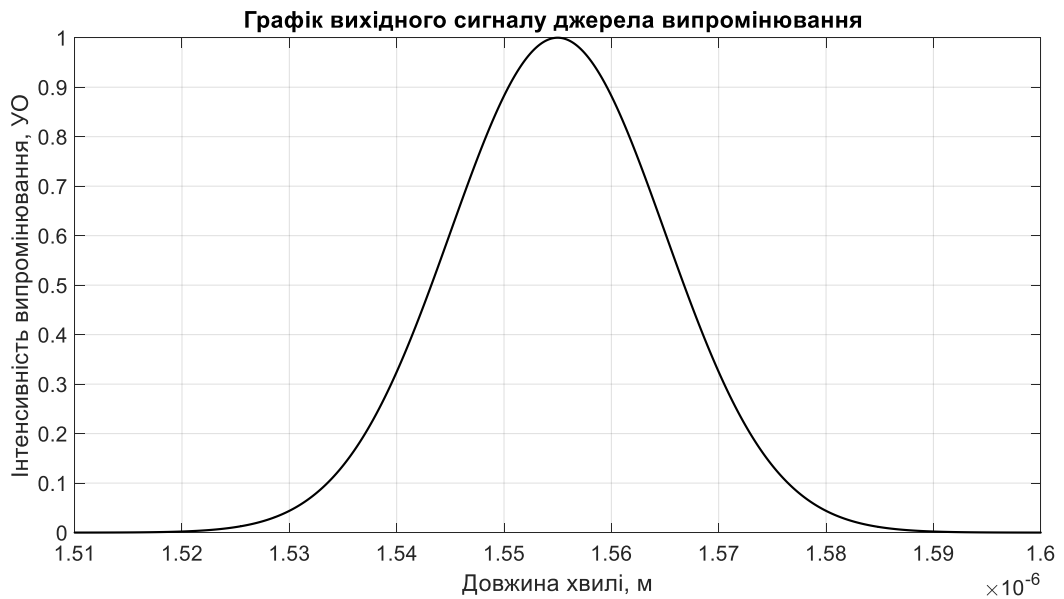


Рис. 2.10. Модель вихідного сигналу випромінювача

При пропусканні сигналу джерела випромінювання через бреггівський ВОД частина спектру проходить, а інша частина сигналу, що відбивається та фіксується спектральним аналізатором (детектором). При деформації пік відбитого спектру зміщується відносно початкового значення при якому датчик знаходився у стані спокою.

Відбита частина сигналу характеризується Гаусівським нормальним розподілом і зображена на рис.2.11 та 2.12 [26].

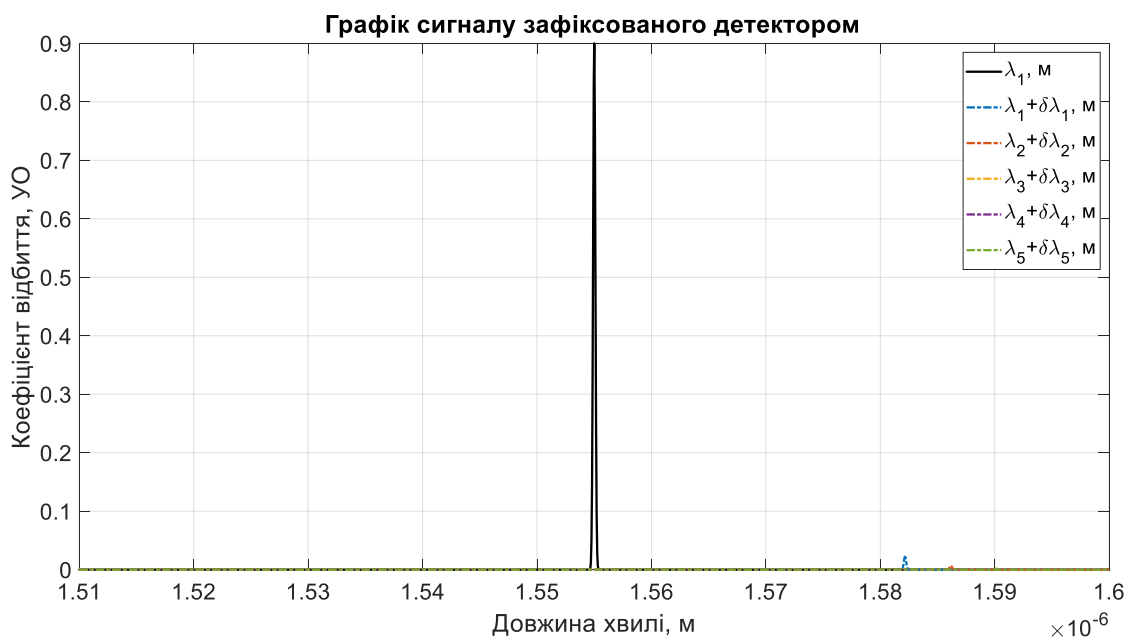


Рис. 2.11. Модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

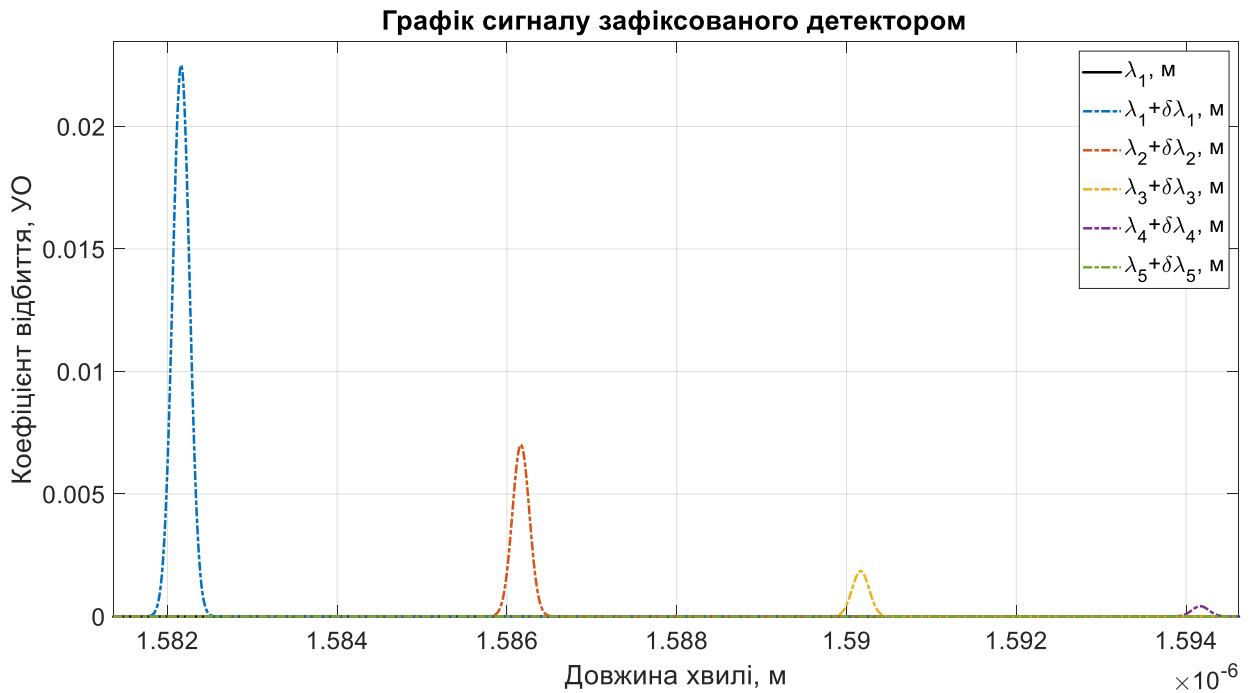


Рис. 2.12. Масштабована модель відбитого сигналу випромінювача
зафіксованого детектором

Спектр, який пройшов через ВБР характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис.2.10. та відбитого спектру, який представлений на рис.2.11 та 2.12. Моделі прохідного спектру зображений на рис.2.13 та 2.14 [26].

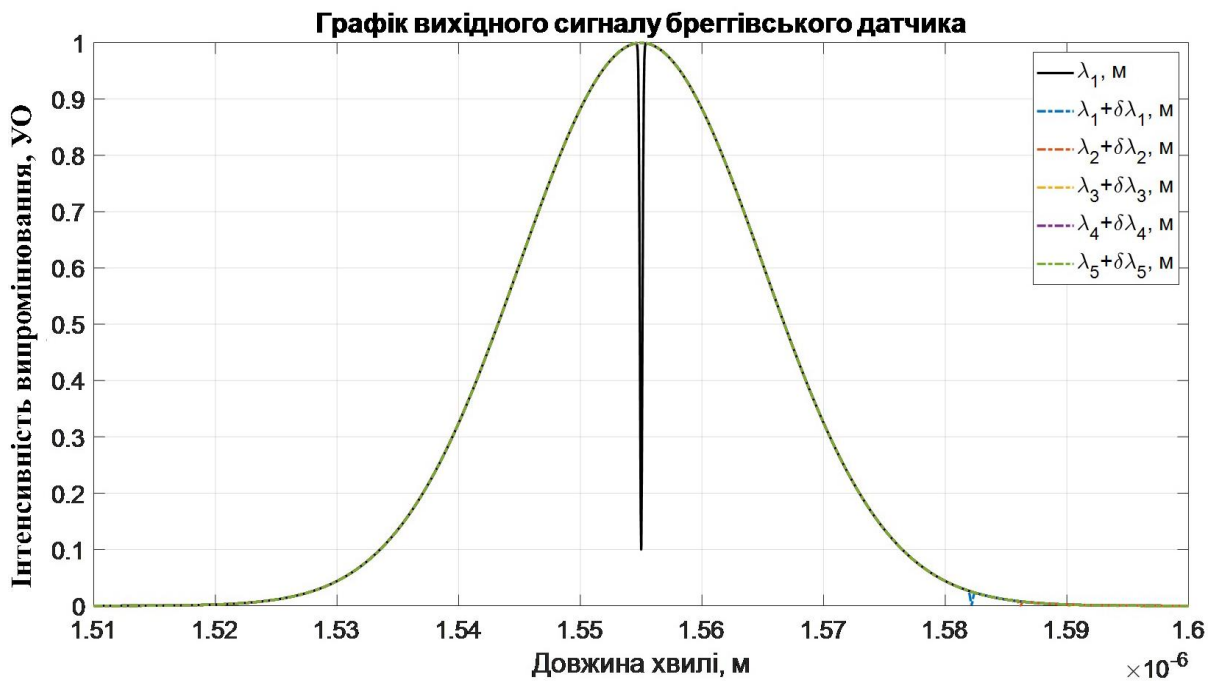


Рис. 2.13. Модель вихідного сигналу ВОД

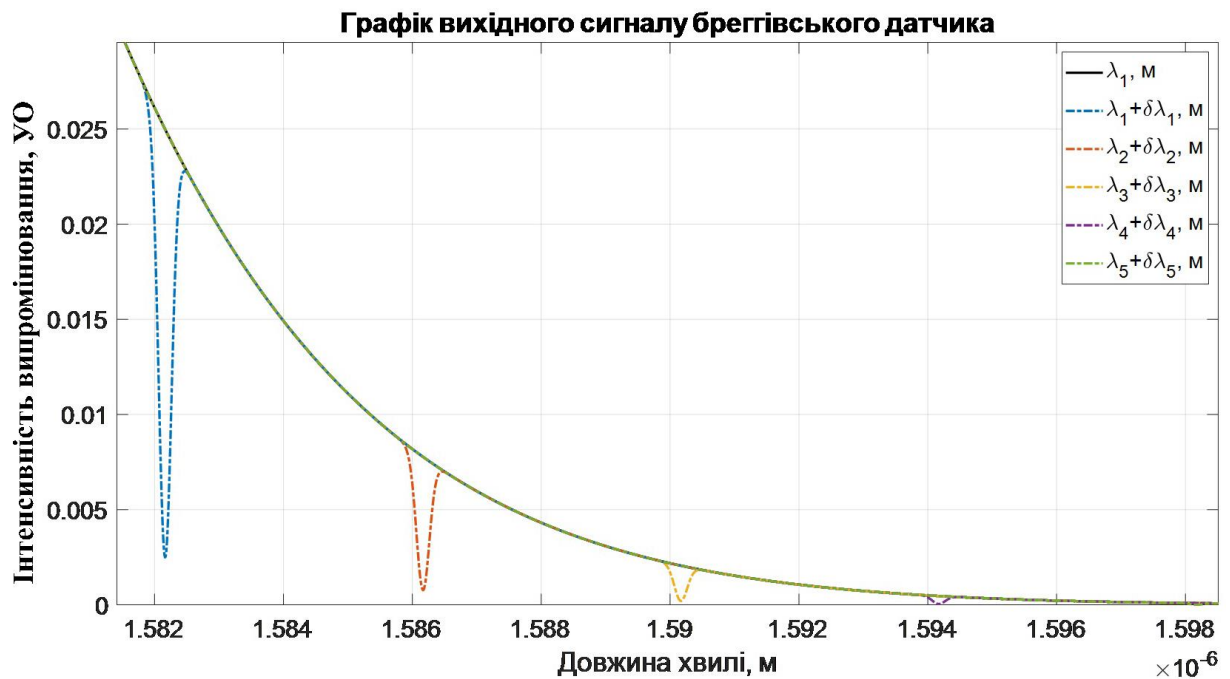


Рис. 2.14. Масштабована модель вихідного сигналу ВОД

Таким чином, з графіків представлених на рис. 2.9 (без урахування температурної складової) та рис. 2.14 можна зазначити, що температурна складова збільшує зсув довжини хвилі на близько 25.5%.

2.3.4. Моделювання системи на основі одного датчика ВБР з деформацією, зміною температури при різних значеннях періоду берегівської решітки

При використанні берегівської решітки з періодом 1,545 мкм вхідний сигнал, який являє собою світловий промінь, з джерела випромінювання подається на берегівський датчик по оптоволоконному світоводу. Спектральна характеристика сигналу показана на рис.2.15. Даний сигнал піддається Гаусівському нормальному розподілу.

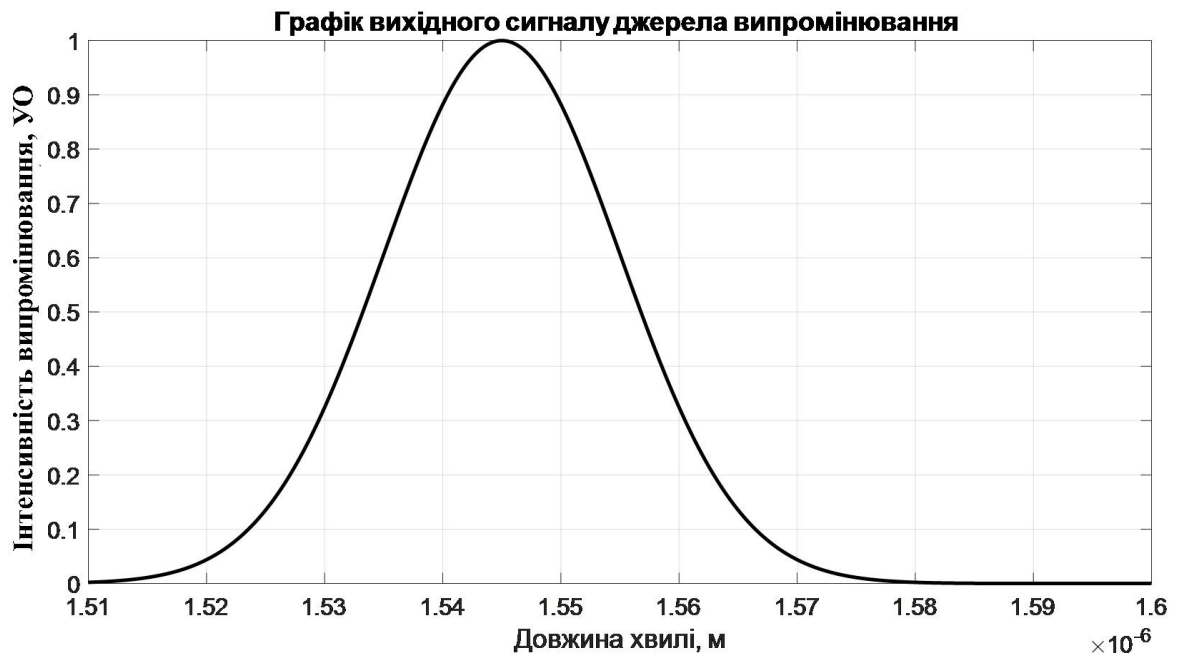


Рис.2.15. Модель вихідного сигналу випромінювача

При пропусканні сигналу з джерела випромінювання через бреггівський датчик відбувається часткове відбивання сигналу та його фіксування детектором. Відбита частина сигналу характеризується Гаусівським нормальним розподілом і зображена на рис.2.16 та рис.2.17.

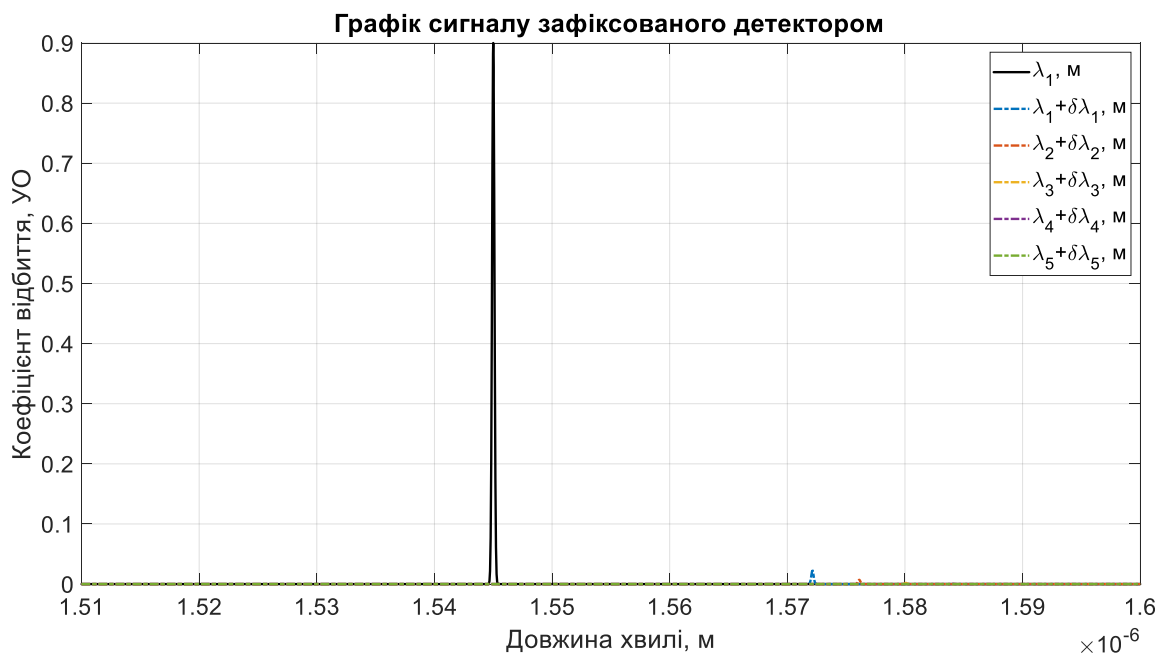


Рис. 2.16. Модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором



Рис. 2.17. Масштабована модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

Модель прохідного спектру, який на виході з ВБР характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис.2.15. та відбитого спектру, який представлений на рис.2.16 зображений на рис.2.18 та рис.2.19.

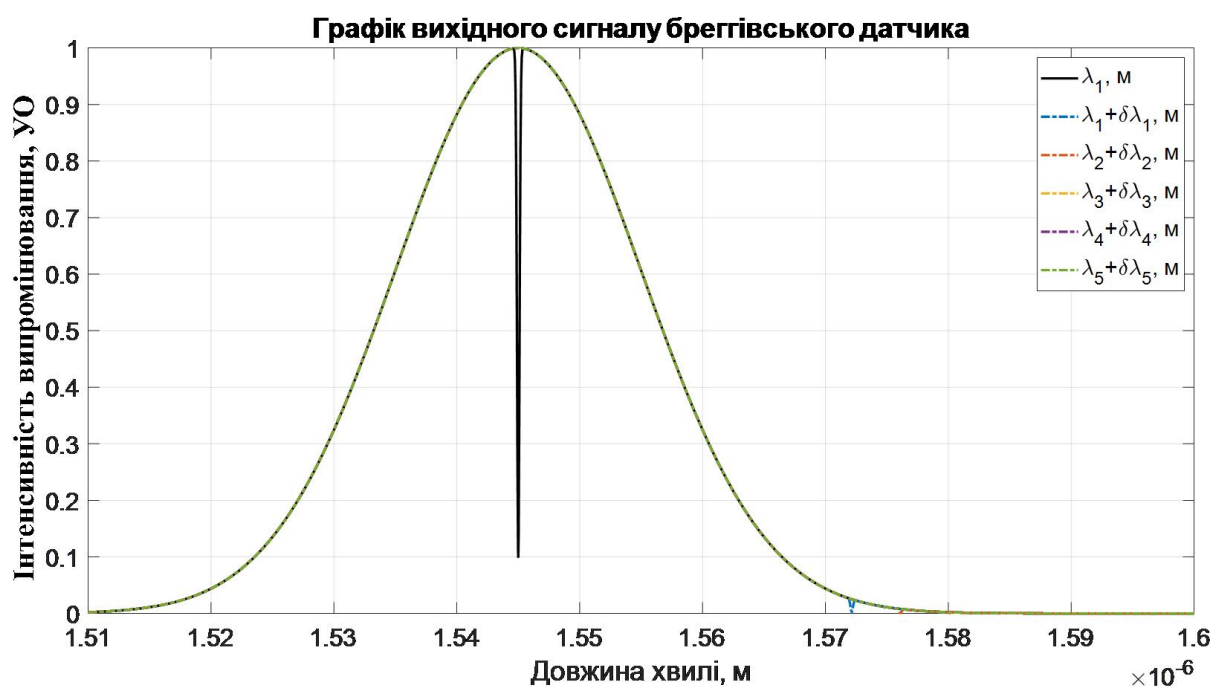


Рис. 2.18. Модель вихідного сигналу ВОД

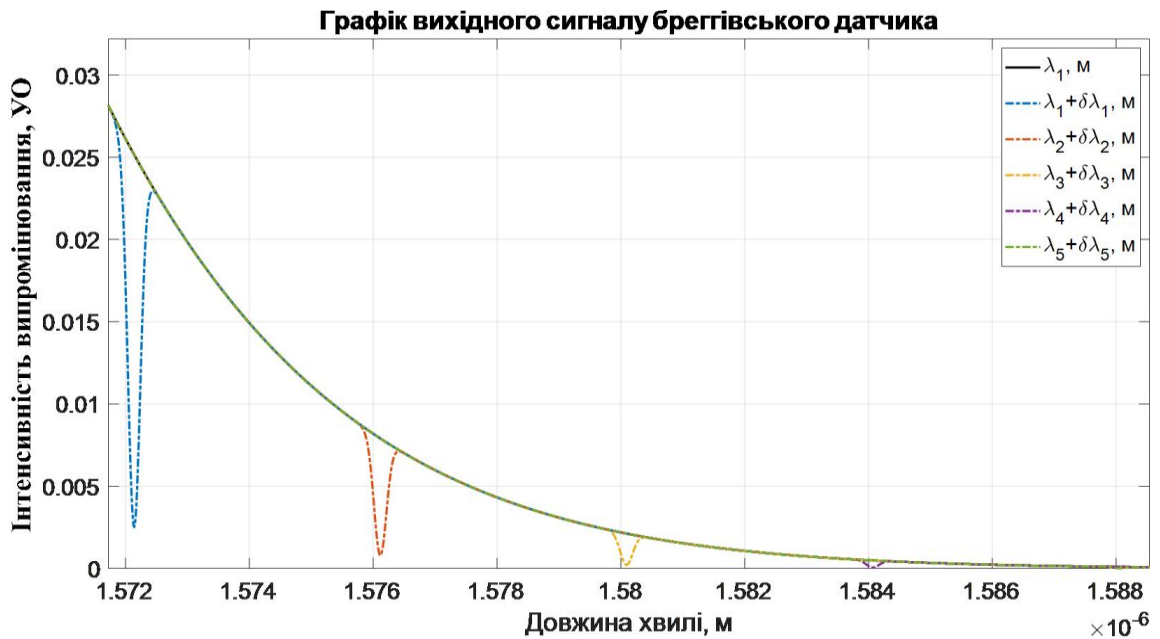


Рис. 2.19. Масштабована модель вихідного сигналу ВОД

В порівнянні з моделлю (2.14) можна зробити висновок, що при меншому періоді берегівської решітки відбувається зсув коефіцієнтів по довжині хвилі.

Спектральна характеристика вхідного сигналу при використанні берегівської решітки з періодом 1,535 мкм показана на рис.2.20. Даний сигнал піддається Гаусівському нормальному розподілу.

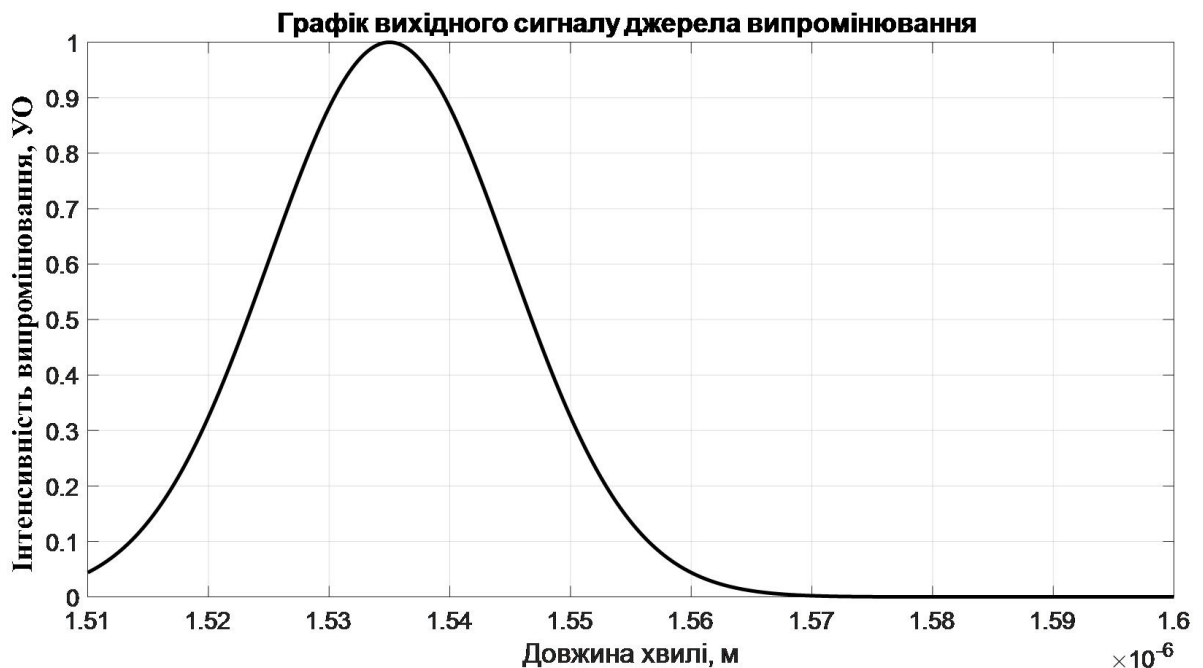


Рис.2.20. Модель вихідного сигналу випромінювача

При пропусканні сигналу з джерела випромінювання через брегтівський датчик відбувається часткове відбивання сигналу та його фіксування детектором. Відбита частина сигналу характеризується Гаусівським нормальним розподілом і зображена на рис.2.21 та рис.2.22.

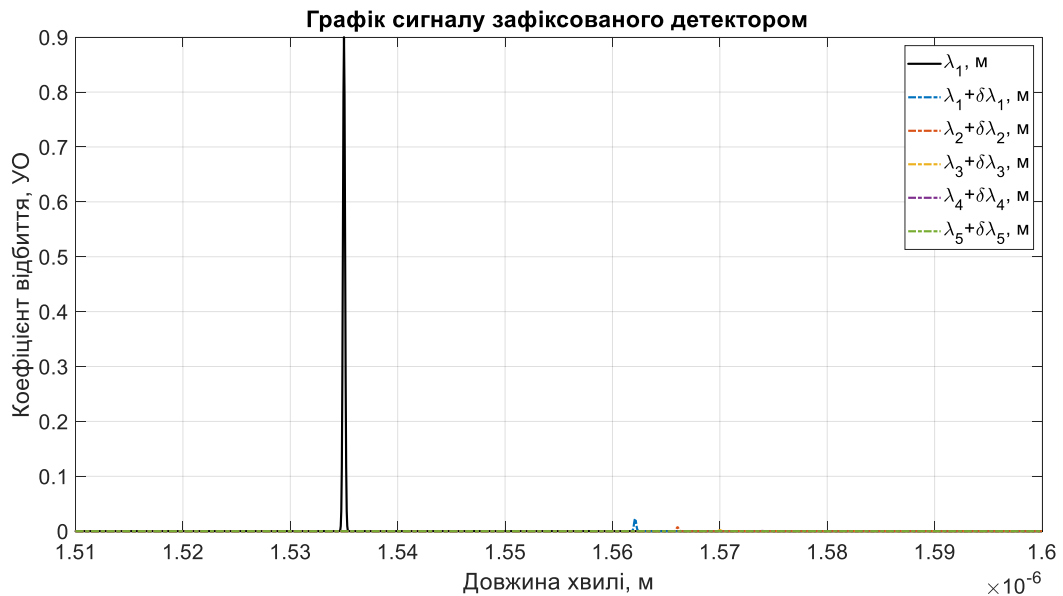


Рис. 2.21. Модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

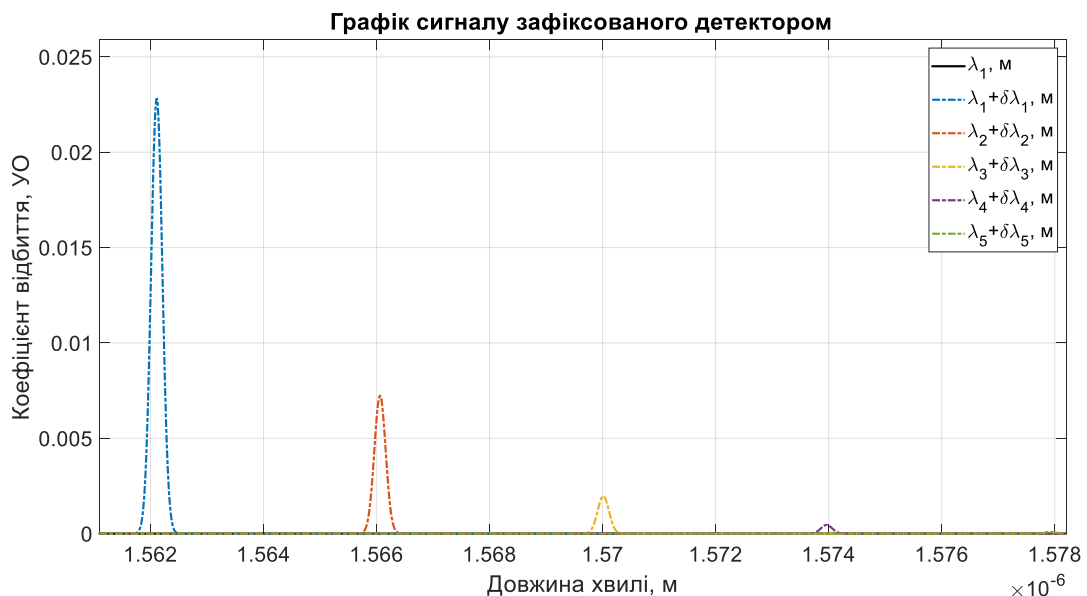


Рис. 2.22. Масштабована модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

Модель прохідного спектру, який на виході з ВБР характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис.2.20. та відбитого спектру, який представлений на рис.2.21 зображений на рис.2.23 та рис.2.24.

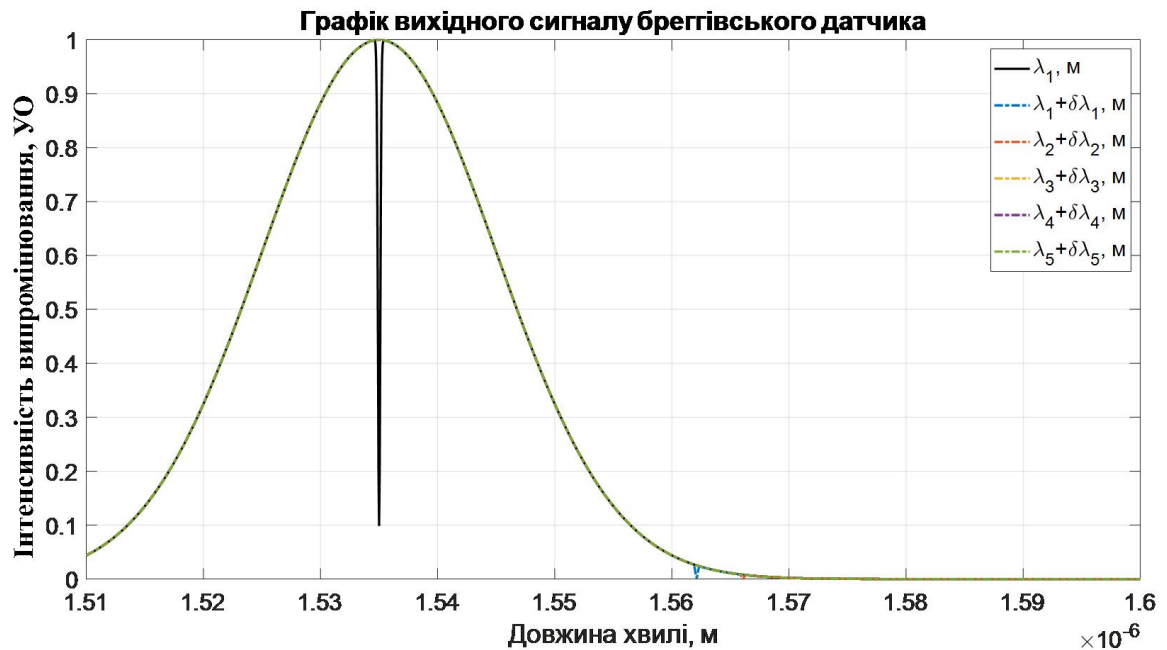


Рис. 2.23. Модель вихідного сигналу ВОД

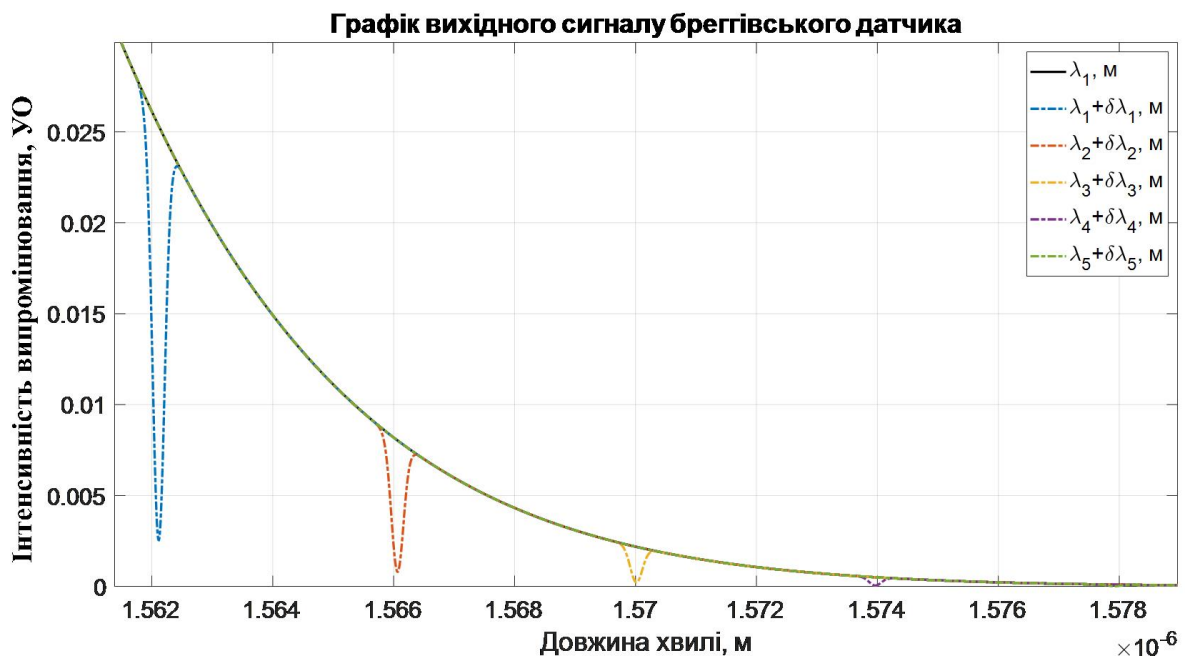


Рис. 2.24. Масштабована модель вихідного сигналу ВОД

В порівнянні з моделлю (2.14) та (2.19) можна зробити висновок, що при зменшенні періоду брегівської решітки відбувається збільшення зсуву коефіцієнтів по довжині хвилі.

Спектральна характеристика вхідного сигналу при використанні брегівської решітки з періодом 1,525 мкм показана на рис.2.25. Даний сигнал піддається Гаусівському нормальному розподілу.

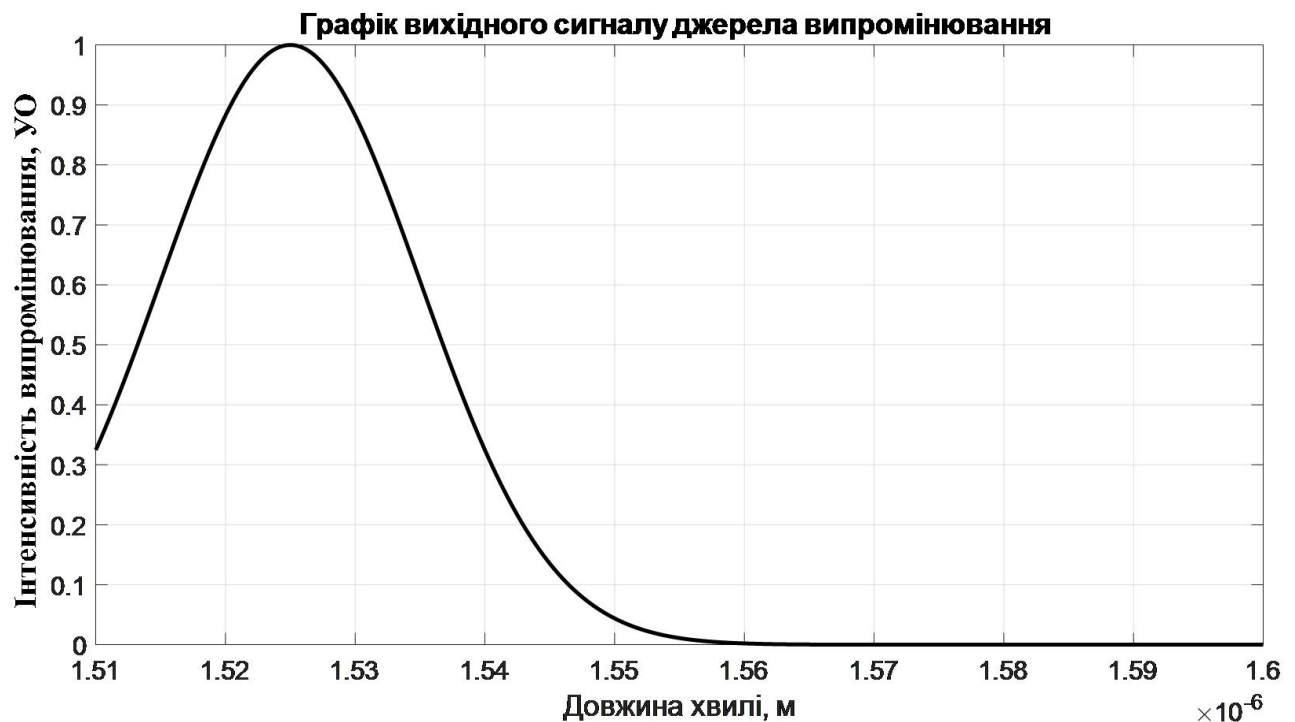


Рис.2.25. Модель вихідного сигналу випромінювача

При пропусканні сигналу з джерела випромінювання через брегівський датчик відбувається часткове відбивання сигналу та його фіксування детектором. Відбита частина сигналу характеризується Гаусівським нормальним розподілом і зображена на рис.2.26 та рис.2.27.

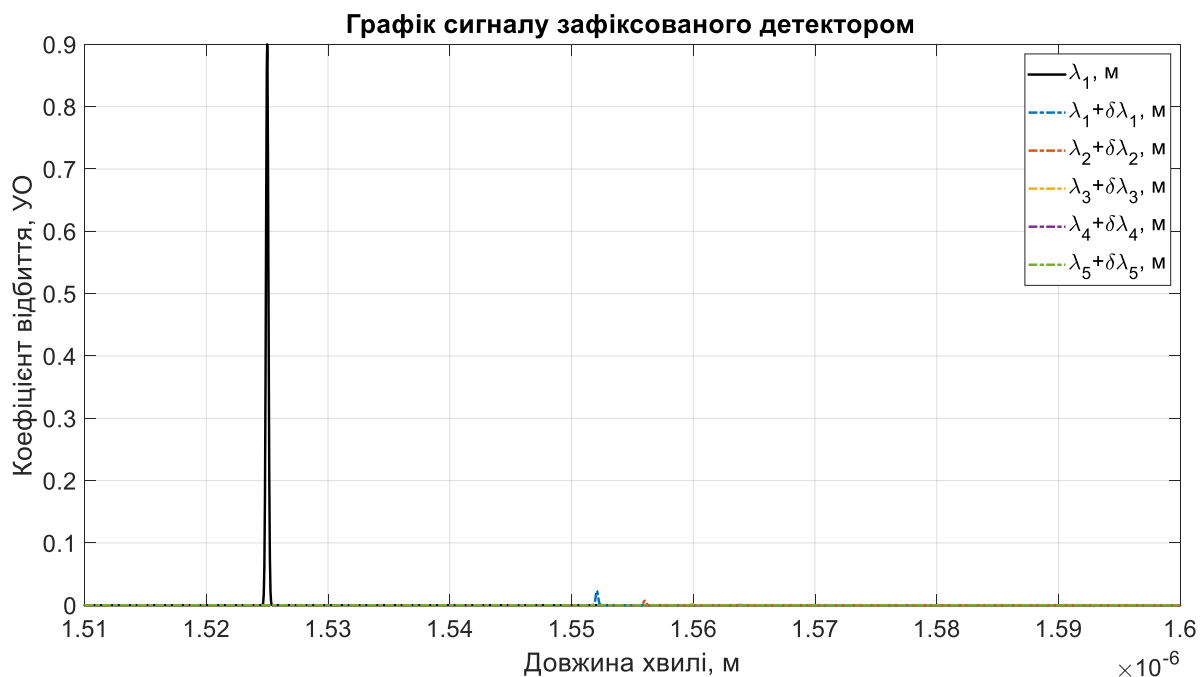


Рис. 2.26. Модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

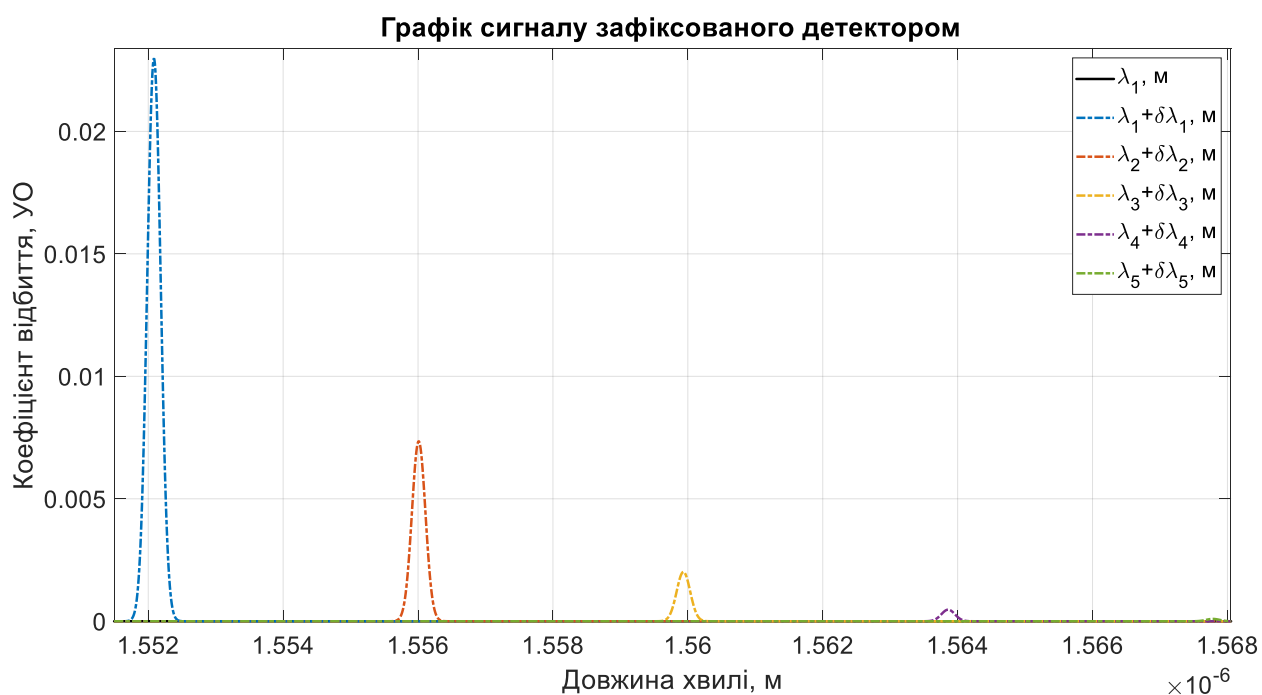


Рис. 2.27. Масштабована модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

Модель прохідного спектру, який на виході з ВБР характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис.2.25. та відбитого спектру, який представлений на рис.2.26 зображений на рис.2.28 та рис.2.29.

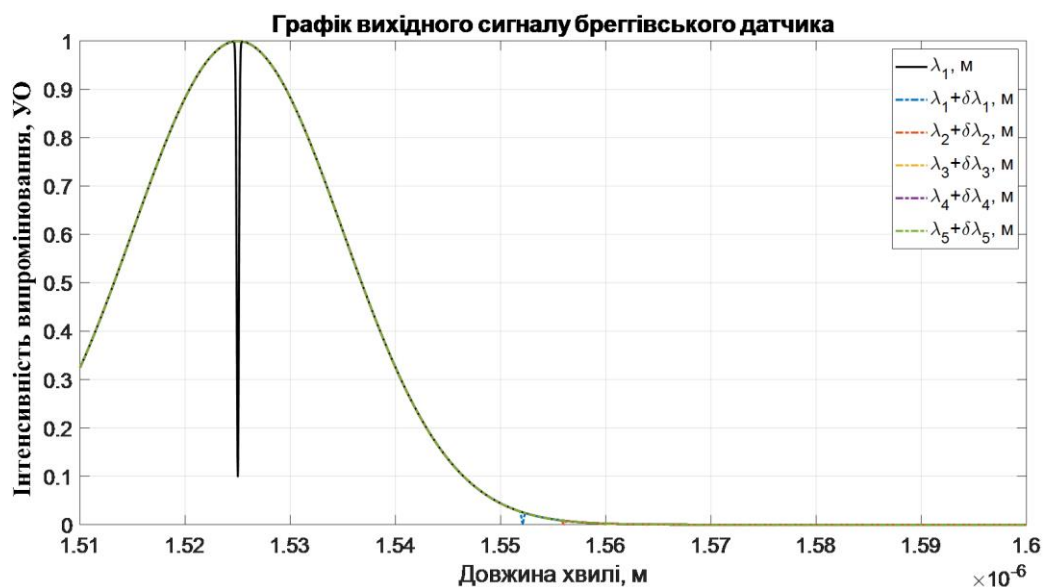


Рис. 2.28. Модель вихідного сигналу ВОД

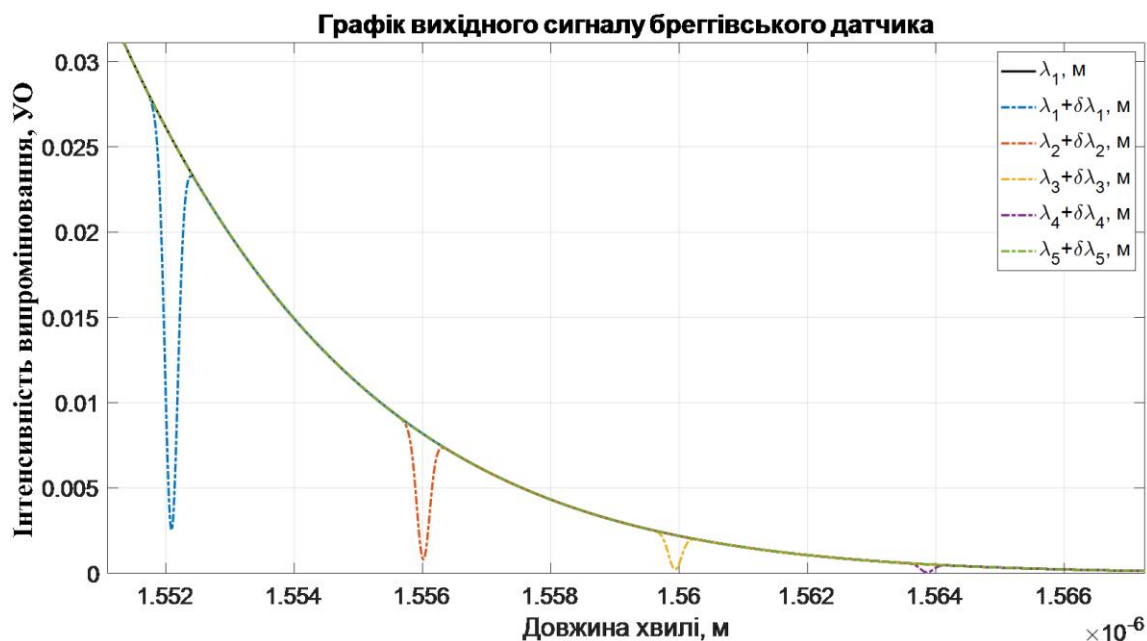


Рис. 2.29. Масштабована модель вихідного сигналу ВОД

В порівнянні з моделлю (2.14) та (2.29) можна зробити висновок, що при зменшенні періоду брегівської решітки відбувається збільшення зсуву коефіцієнтів по довжині хвилі.

2.3.5. Моделювання п'яти ВОД з рівномірно розподіленими періодами решіток

Моделювання п'яти волоконно-оптичних датчиків на основі брегівських решіток з різним значенням періоду та деформацією, значення яких:

$$\lambda_1 = 1537 \text{ нм}$$

$$\lambda_2 = 1539 \text{ нм}$$

$$\lambda_3 = 1541 \text{ нм}$$

$$\lambda_4 = 1543 \text{ нм}$$

$$\lambda_5 = 1545 \text{ нм}$$

$$\varepsilon = 15 \cdot 10^{-4}$$

Вхідний сигнал з джерела випромінювання подається на брегівський датчик по оптоволоконному світловоду і являє собою світловий промінь із спектральною характеристикою показаною на рис.2.30. Вхідний сигнал піддається Гаусівському нормальному розподілу.

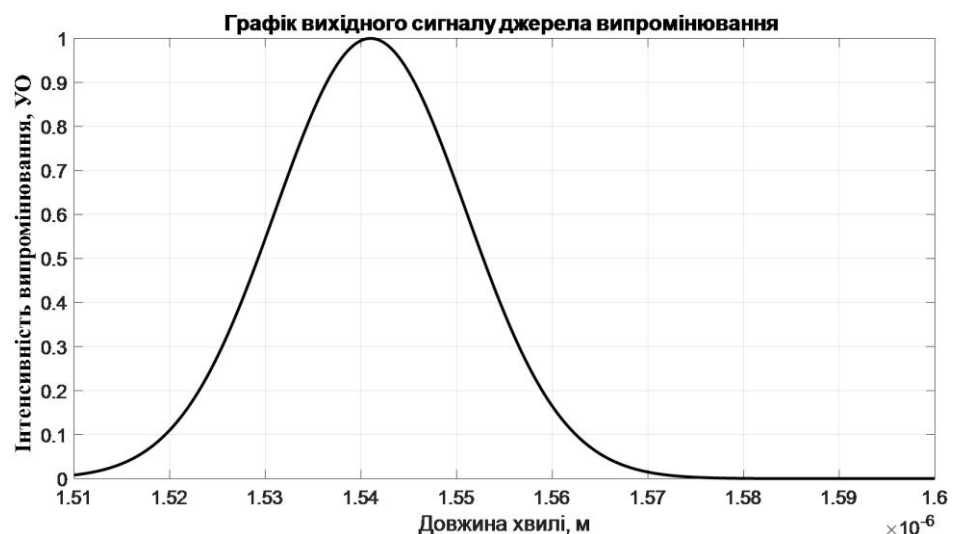


Рис.2.30. Модель вихідного сигналу випромінювача

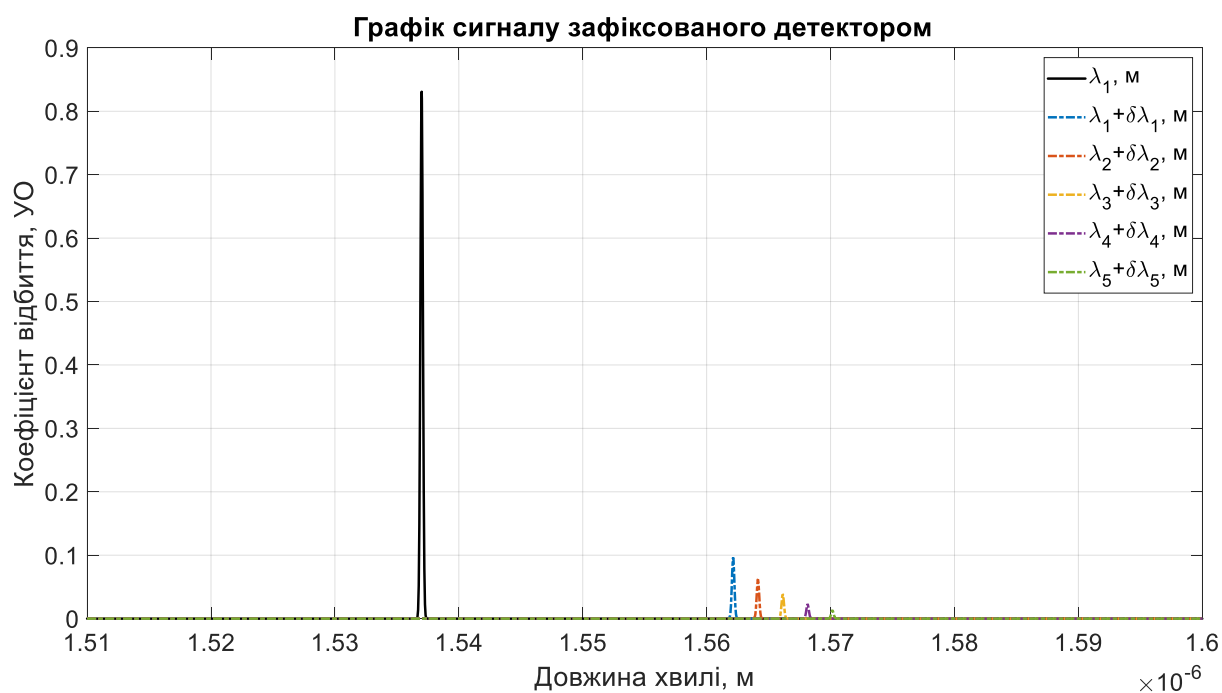


Рис. 2.31. Модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

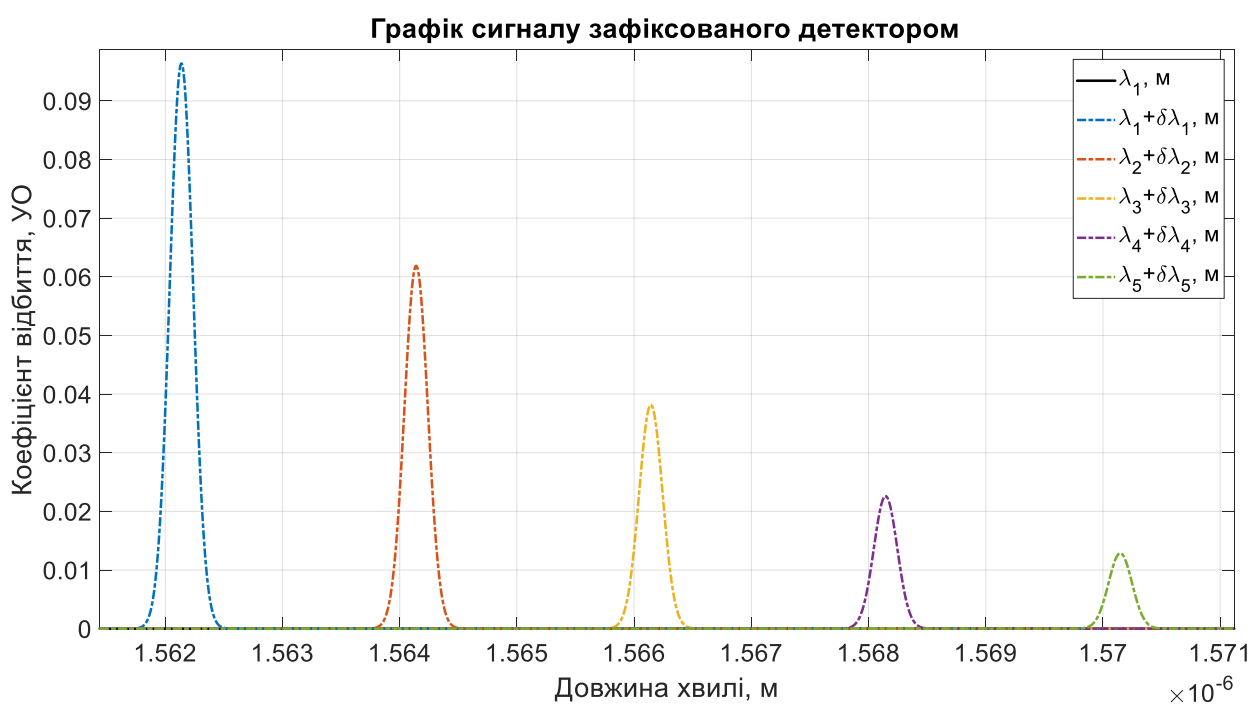


Рис. 2.32. Масштабована модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

При пропусканні сигналу джерела випромінення через бреггівський ВОД частина спектру проходить, а інша частина сигналу відбивається та фіксується детектором (2.31). При деформації пік відбитого спектру зміщується відносно початкового значення при якому датчик знаходився у стані спокою. Величина зміщення характеризується зсувом по довжині хвилі і є наступною:

$$\Delta\lambda_1 = 2.5141 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_2 = 2.5143 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_3 = 2.5148 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_4 = 2.5151 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_5 = 2.5154 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

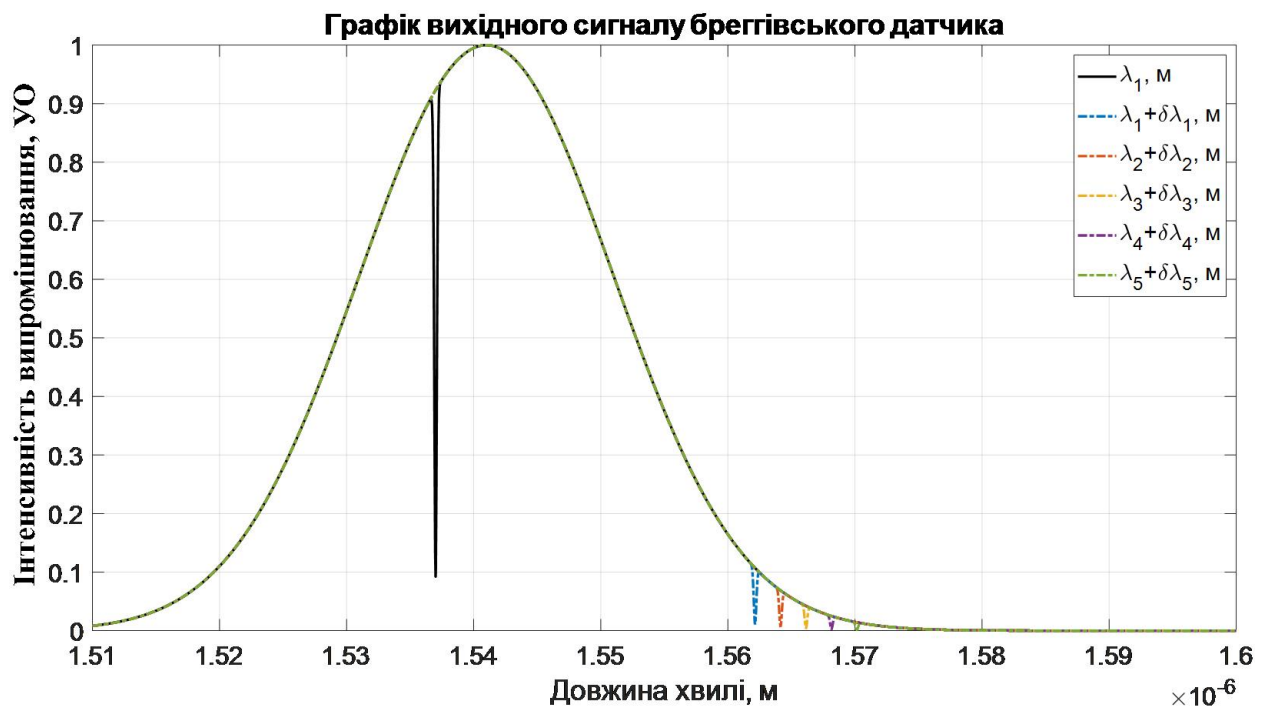


Рис. 2.33. Модель вихідного сигналу ВОД

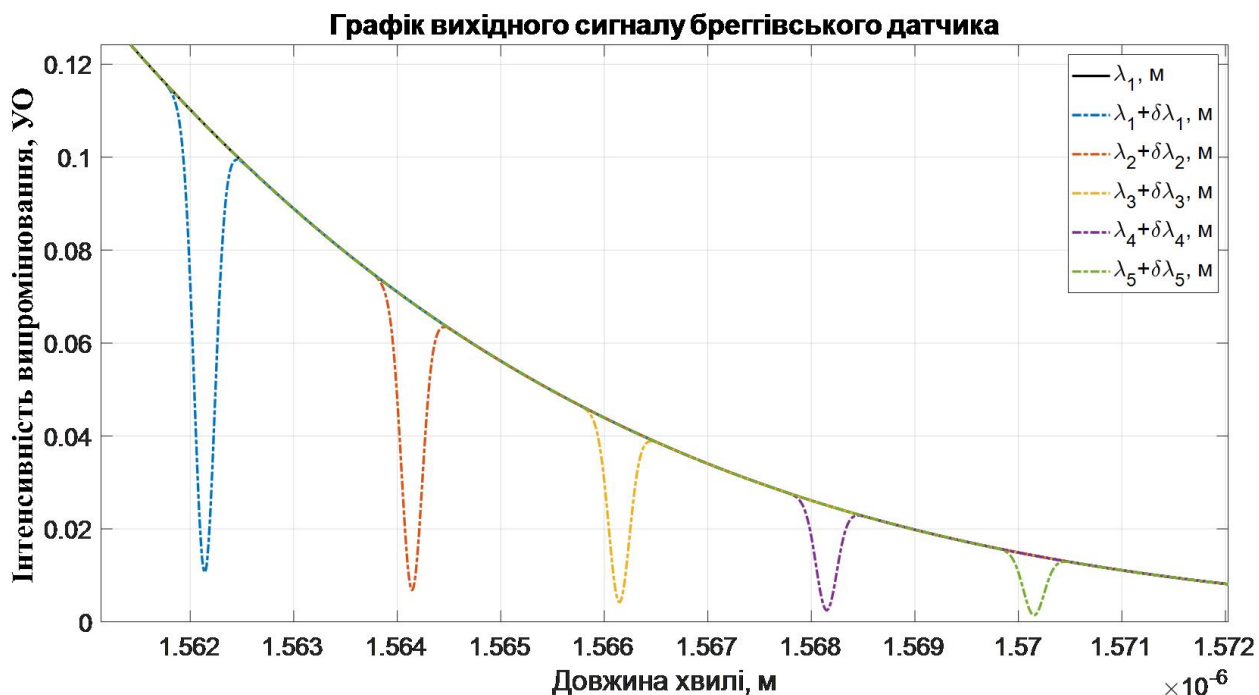


Рис. 2.34. Масштабована модель вихідного сигналу ВОД

Спектр, який пройшов через волоконну бреггівську решітку характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис.2.30 та відбитого спектру, який представлений на рис.2.31. На рис.2.33 представлений вихідний сигнал волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток. Графік представляє залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі при однакових значеннях параметру деформації.

Таким чином, збільшення періоду бреггівської решітки веде до збільшення зсуву по довжини хвилі, а зменшення періоду до зменшення зсуву по довжині хвилі.

2.3.6. Моделювання п'яти ВОД з нерівномірно розподіленими періодами решіток

Моделювання п'яти волоконно-оптичних датчиків на основі бреггівських решіток з різним значенням періоду та деформацією, значення яких:

$$\lambda_1 = 1535 \text{ нм}$$

$$\lambda_2 = 1542 \text{ нм}$$

$$\lambda_3 = 1549 \text{ нм}$$

$$\lambda_4 = 1552 \text{ нм}$$

$$\lambda_5 = 1555 \text{ нм}$$

$$\varepsilon = 15 \cdot 10^{-4}$$

Вхідний сигнал з джерела випромінювання подається на бреггівський датчик по оптоволоконному світловоду і являє собою світловий промінь із спектральною характеристикою показаною на рис.2.35. Вхідний сигнал піддається Гаусівському нормальному розподілу.

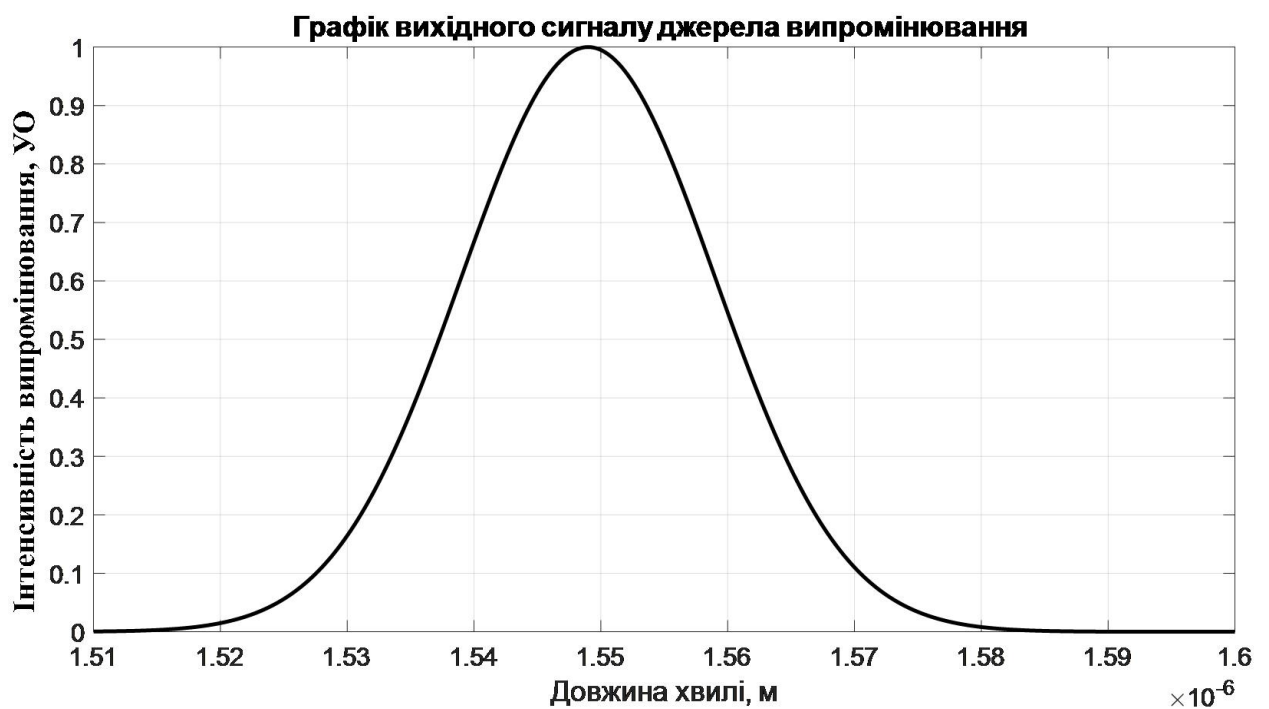


Рис.2.35. Модель вихідного сигналу випромінювача

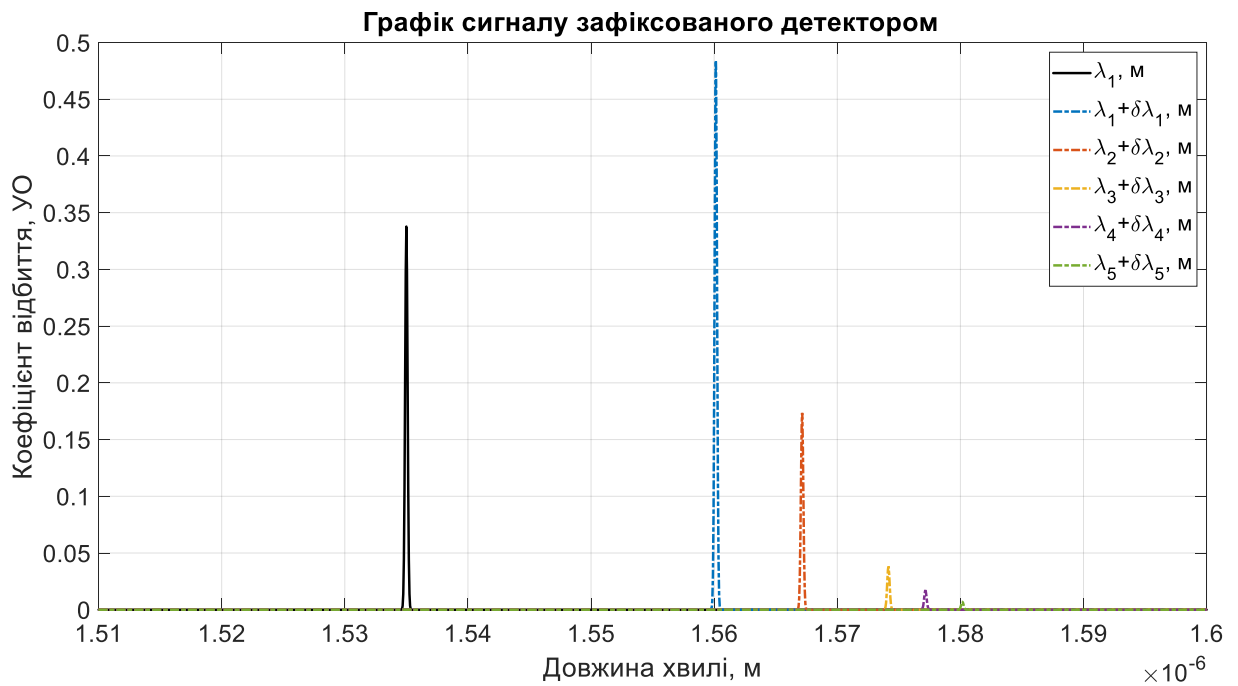


Рис. 2.36. Модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

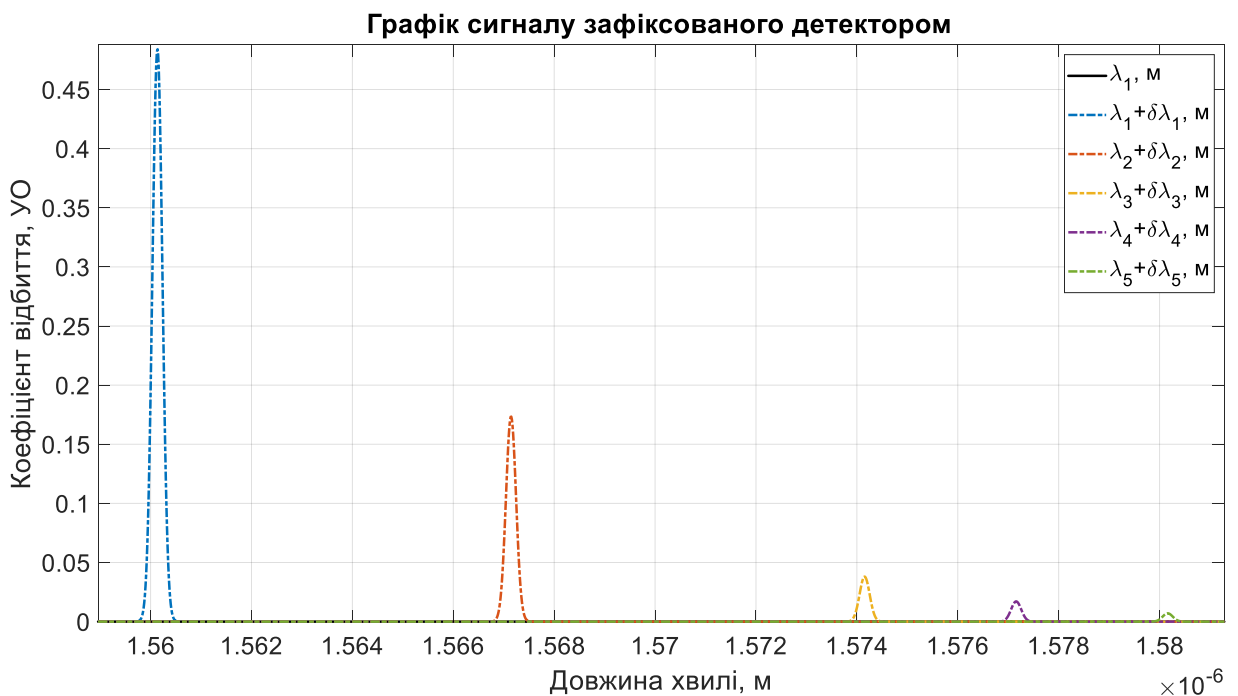


Рис. 2.37. Масштабована модель відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

Частина сигналу з джерела випромінення, яка проходить через берегівський датчик, відбивається та фіксується детектором (2.36). При деформації пік відбитого спектру зміщується відносно початкового значення при якому датчик знаходився у стані спокою. Величина зміщення характеризується зсувом по довжині хвилі і є наступною:

$$\Delta\lambda_1 = 2.5139 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_2 = 2.5147 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_3 = 2.5156 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_4 = 2.5160 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

$$\Delta\lambda_5 = 2.5163 \cdot 10^{-8} \text{ нм}$$

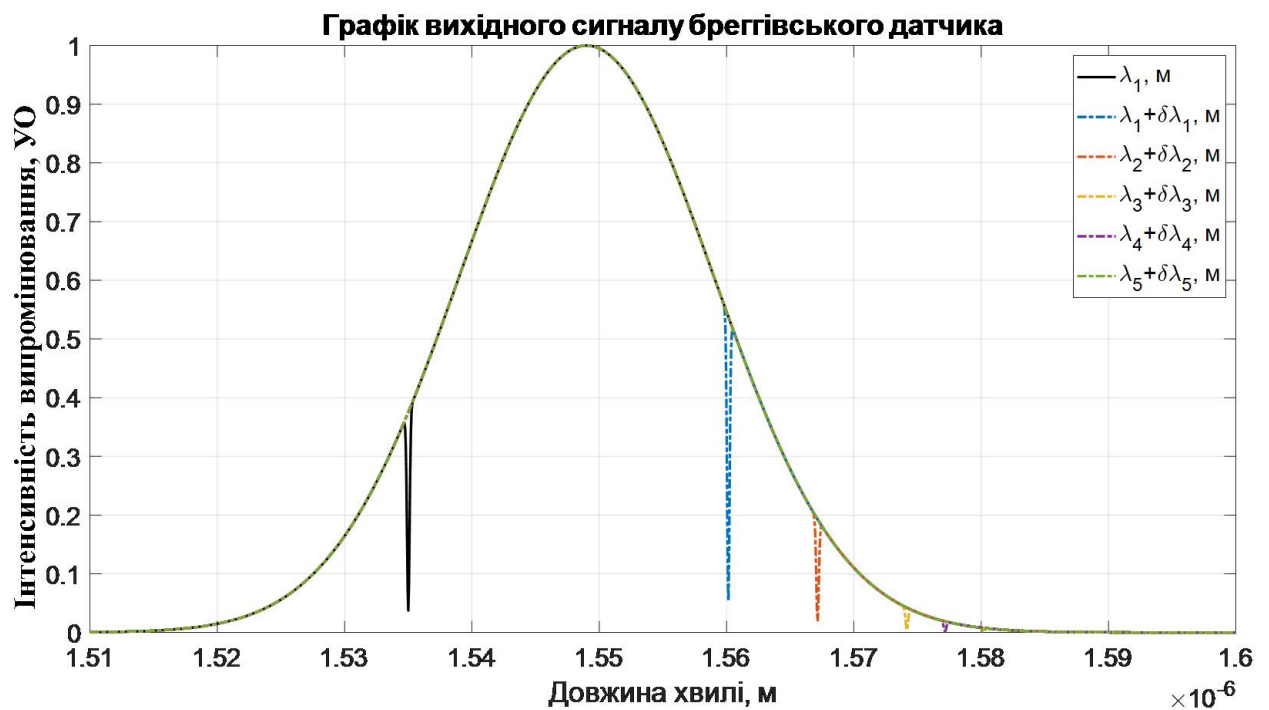


Рис. 2.38. Модель вихідного сигналу ВОД



Рис. 2.39. Масштабована модель вихідного сигналу ВОД

Спектр, який пройшов через волоконну бреггівську решітку характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис.2.35 та відбитого спектру, який представлений на рис.2.36. Вихідний сигнал ВОД на основі бреггівських решіток представлений на рис.2.38. Графік представляє залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі при однакових значеннях параметру деформації.

Таким чином, збільшення періоду бреггівської решітки веде до збільшення зсуву по довжини хвилі, а зменшення періоду до зменшення зсуву по довжині хвилі.

2.3.7. Моделювання системи на основі 25-ти датчиків ВБР з деформацією

Дослідження та моделювання системи, яка складається з масиву 5x5 волоконно-оптичних датчиків на основі бреггівських решіток з періодом 1,555 мкм розміщених на деякій конструкції (рис. 2.40).

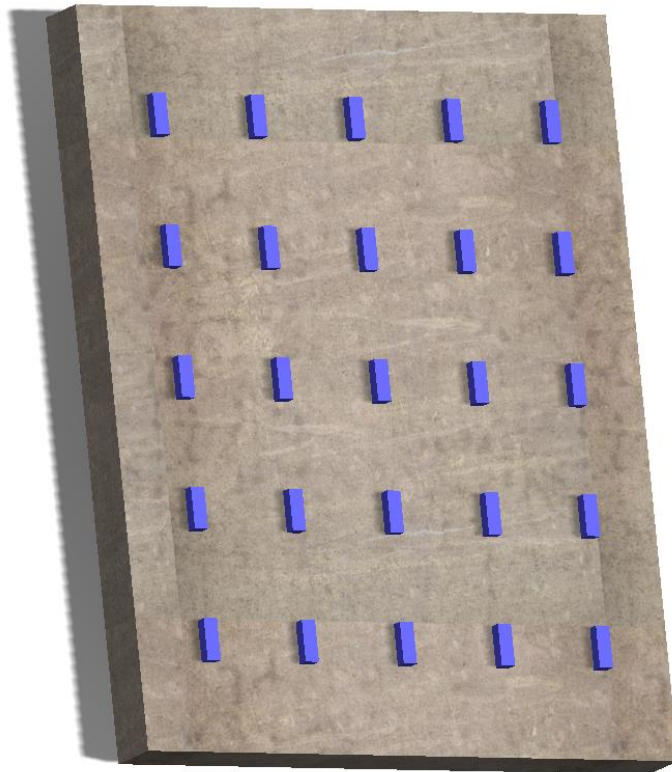


Рис. 2.40 Розміщення ВОД на конструкції

Деформація задається відповідно виразу (2.5). При дії деформації було проведено моделювання роботи датчиків з використанням пакету Matlab і отримано 3D – модель показань ВОД, яка представлена на рис.2.41.

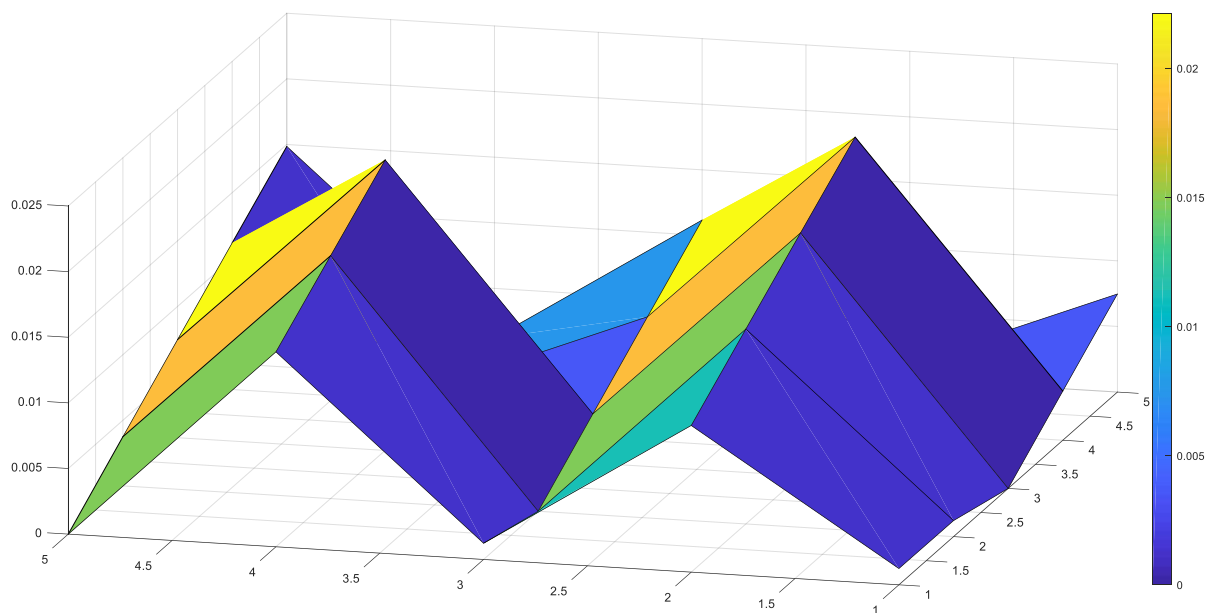


Рис. 2.41. Просторова модель роботи ВОД при впливі деформації

2.3.8. Моделювання системи на основі декількох датчиків ВБР з зміною температури

Дослідження та моделювання системи, яка складається з масиву 5x5 волоконно-оптичних датчиків на основі брегівських решіток з періодом 1,555 мкм. Температурна складова задається відповідно значень (2.5). Без дії деформації при впливі температури було проведено моделювання роботи датчиків і отримано 3D – модель показань ВОД, яка представлена на рис.2.42.

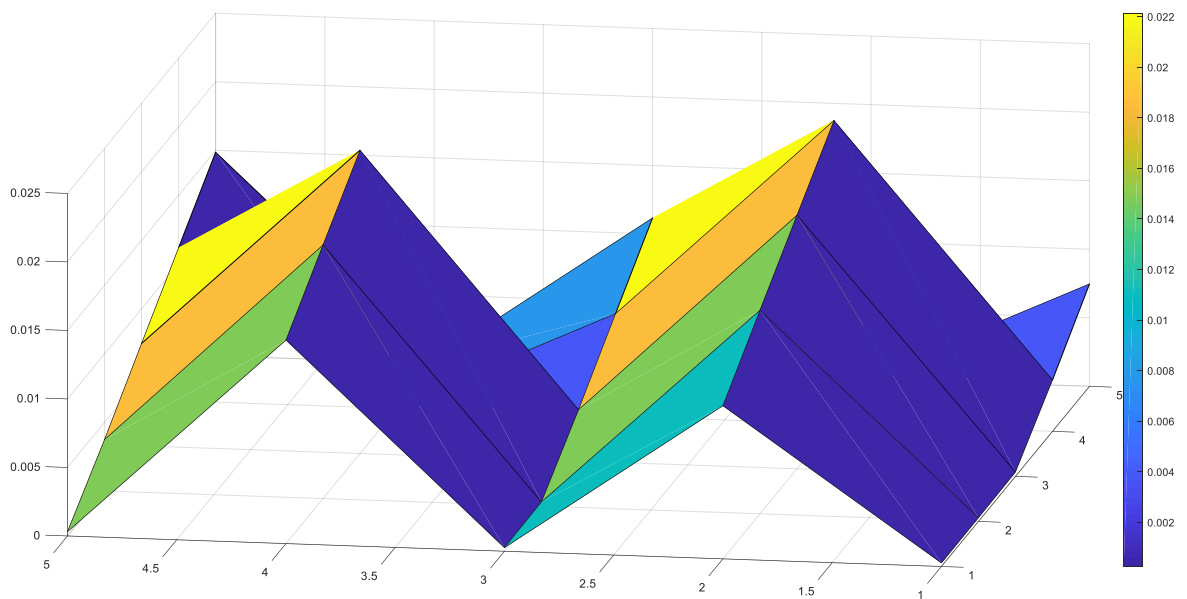


Рис. 2.42. Просторова модель роботи ВОД при впливі температури

2.3.9. Моделювання системи на основі декількох датчиків ВБР під впливом деформації та зміною температури

Дослідження та моделювання системи, яка складається з масиву 5x5 волоконно-оптичних датчиків на основі брегівських решіток з періодом 1,555 мкм. При дії деформації та впливі температури, які задані відповідно (2.5), було проведено моделювання роботи датчиків і отримано 3D – модель показань ВОД, яка представлена на рис.2.43.

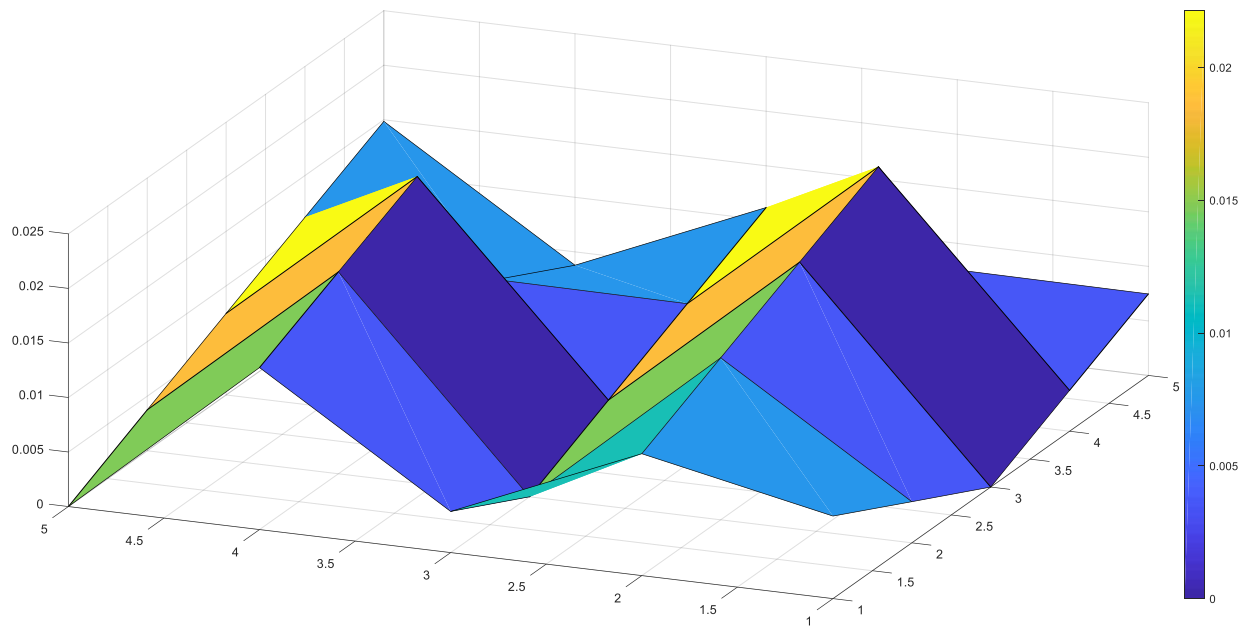


Рис. 2.43. Просторова модель роботи ВОД при впливі деформації та температури

Таким чином, з рис. 2.41-2.43 видно, що конструкція, на якій розташовані датчики, знаходиться під впливом деформації, що призведе до появи мікротріщин, як зображено на рис. 2.44.

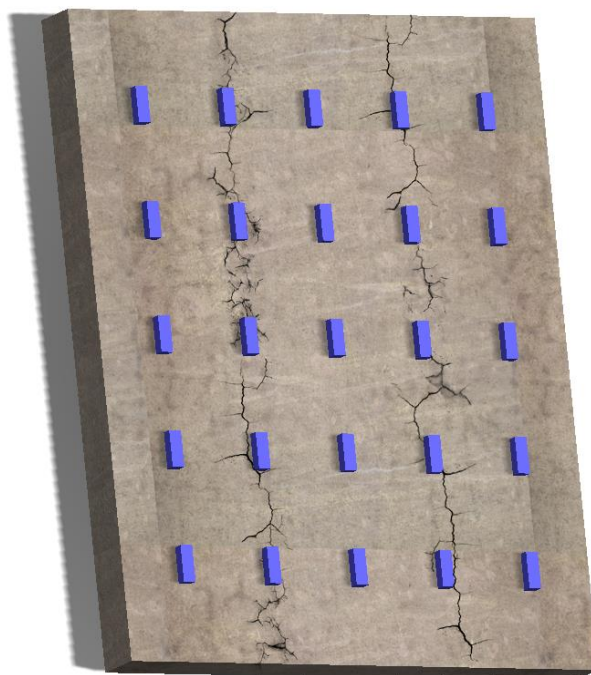


Рис. 2.44. Розміщення дефектів, відповідно отриманим моделям роботи датчиків

2.3.10. Висновок до розділу 2

Було проведено моделювання волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток при впливі деформації, температури. В процесі виконання моделювання було з'ясовано, що під впливом температури збільшується зсув довжини хвилі на близько 25.5%. Зміна періоду бреггівської решітки впливає на зсув довжини хвилі. При збільшенні періоду решітки збільшується і зсув довжини хвилі, при зменшенні відповідно. Було приведено моделювання п'яти датчиків з різними періодами бреггівських решіток, моделювання 25-ти датчиків встановлених на деяку конструкцію та наведено графічне зображення дефектів конструкції, які з'явилися через вплив зафіксованої датчиками деформації.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

3.1. Розробка стартап-проекту «Імітаційне моделювання 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.

3.2. Опис ідеї

Розглянувши в попередніх розділах основні аспекти моєї теми, можна приступити до розробки стартап-проекту. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту «Імітаційне моделювання 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 3.1.

У таблиці 3.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 3.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Необхідні ресурси	Опис проблеми, що вирішує проект	Головні цілі та завдання	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Програма для моделювання процесу вимірювання деформації	Програмне забезпечення Matlab	Проблема вибору точного розташування датчика на об'єкті	Дати змогу змодельовати поведінку датчика перед його встановленням на об'єкті	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. 3.2).

Таблиця 3.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ н/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.

3.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 3.3):

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

В таблиці 3.3 проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Для того щоб реалізувати проект, використовується програмне забезпечення Matlab, який є доступним для використання в проекті.

Програма для моделювання деформації за допомогою волоконно-оптичного датчика є новою технологією, яка використовується в проекті.

Таблиця 3.3. 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 волоконнооптичного датчика	Не існуюча технологія	Не доступна технологія
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: за рахунок нових алгоритмів для написання програми				

Висновок: проаналізувавши таблицю 3.3. 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.

3.3. 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 приведену до земельної площі масу прибутку. Рівень рентабельності (R) визначається за формулою:

$$R = \frac{\Pi}{Вв} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

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%). 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 3.4).

Таблиця 3.4. 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. 3.5).

Таблиця 3.5. 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. 3.7.) проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 3.6.). Результати занесемо до таблиці в порядку зменшення значущості:

Таблиця 3.6. 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 3.7).

Таблиця 3.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання конкурентів	Зростання конкурентноспроможних компаній або фірм	Покращення характеристик програми, випуск нових онкуренто-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	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. 3.8.), де визначимо загальні риси конкуренції на ринку:

Таблиця 3.8. 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. 3.9.)

Таблиця 3.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
Складові аналізу	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку заміників
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 Постачальники 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 впливається в необхідність підвищувати репутацію своєї компанії на той самий рівень (в перспективі).

На основі аналізу конкуренції в галузі, проведеного в табл. 3.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, які були розглянуті в табл. 3.2, вимог споживачів до товару (табл. 3.5.) та факторів маркетингового середовища (табл. 3.6, 3.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів

конкурентоспроможності. Аналіз конкурентоспроможності представлено в табл. 3.10.

Таблиця 3.10. 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 специфічністю 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 3.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з програмами розробленими 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 3.10 та 3.11 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 3.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Гнучка цінова політика; 2. Можливість використання в різних програмних забезпеченнях; 3. Висока якість товару;	Слабкі сторони: 1. Низька репутація підприємства на початку впровадження проекту в життя; 2. Необхідність значного початкового капіталовкладення (кредит в банку)
Можливості: 1. Швидкий розвиток за рахунок доступності технології; 2. Модифікація алгоритму програми.	Загрози: 1. Винайдення кращих алгоритмів обробки даних; 2. Мінливість ринку.

Висновок: для успішності стартап-проекту необхідно передбачати появу есприятливих 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. 3.13).

Таблиця 3.13. 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.

3.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

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

Таблиця 3.14. 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		Висока	Середній	Не інтенсивна	Середня складність
Цільова група: дослідницьке моделювання, будівництво					

Висновок: за результатами аналізу потенційних груп споживачів ми брали 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 сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 3.15.)

Таблиця 3.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	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. 3.16).

Таблиця 3.16. 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 вверх, за рахунок низької ціни

Висновок: як видно з таблиць 3.14-3.16 обрано цільовими групи ігрова ндустрія, 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. 3.17).

Таблиця 3.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати 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.

3.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 3.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 3.18. 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 3.19. 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		

Далі визначення початкових витрат проекту, які наведені в табл.3.20

Таблиця 3.20. Початкові витрати проекту

№ з/п	Стаття витрат	Обсяги витрат в 0-й рік, тис. грн.
1	Розробка проектних матеріалів	1
2	Робоче проектування і прив'язка проекту	5
3	Витрати на придбання обладнання та устаткування та пристроїв	20
4	Витрати на приймально-здавальні випробування	5
5	Витрати на придбання нематеріальних активів	10
6	Оплата юридичних послуг	10
7	Витрати на передвиробничі маркетингові дослідження і створення збутової мережі	20
8	Витрати, пов'язані з формуванням команди	15
Разом		86

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 (3.21).

Таблиця 3.21. 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 а 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 3.22. 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 3.23. Концепція маркетингових комунікацій

№ п / п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуютьс я цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Огляд продукту, перспектив и на майбутнє	Інтернет, гаряча лінія	Маркетингові дослідження. Встановлення мети позиціонування. Розробка стратегії позиціонування. Розробка тактики позиціонування. Розробка комплексу маркетингу. Оцінка ефективності позиціонування.	Розповсюдже ння інформації про продукт	Підкреслен ня переваг продукту

Висновок: Було обрано ключові позиції: маркетингові дослідження, встановлення мети позиціонування, розробка стратегії позиціонування, розробка

тактики позиціювання, розробка комплексу маркетингу, оцінка ефективності позиціювання. Розглянуто завдання рекламного повідомлення та концепцію рекламного звернення.

3.6. 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

В магістерській дисертації було розглянуто різноманітні датчики, які використовуються у процесі контролю технічного стану інженерних конструкцій, а саме в моніторингу напружено-деформованого стану, який включає в себе оцінку деформації чи інших параметрів матеріалу, викликаних механічною напругою в об'єкті контролю: акселерометри, інклінометри, датчики тиску, тахеометри, тензодатчики, п'єзоелектричні, магнітопружні, волоконно-оптичні датчики.

В роботі було наведено доцільність використання у системі моніторингу волоконно-оптичних датчиків через їх переваги: висока електроізоляційна міцність та висока корозійна та хімічна стійкість, стійкість до мастил та води, малі втрати вимірювання, діаметр і маса, вибухобезпечність, еластичність, широкосмуговість, безіндукційність, механічна міцність, відсутність взаємної інтерференції.

Волоконно-оптичні датчики мають високу точність вимірювань, що дає змогу використовувати їх для виміру статичних і динамічних напруг без спотворень отриманих даних, працюючи в екстремальних умовах. Форм-фактор та малі габаритні розміри дозволяють використовувати ВОД практично в будь-яких тяжко доступних місцях та приладах. Попри всі переваги, волоконно-оптичні датчики мають нижчу собівартість при порівнянні їх з аналогами.

Було досліджено характеристики волоконно-оптичного датчика та розроблено його математичну модель, проведено математичне моделювання поведінки волоконно-оптичного датчика на основі брегівських решіток для випадків: із впливом деформації, впливом деформації та температури. Приведено моделювання декількох ВОД при рівномірному та нерівномірному періоді брегівських решіток, а також моделювання роботи 25-ти волоконно-оптичних датчиків при розміщенні їх на пласкій поверхні при впливі деформації, температури та обох факторів одночасно.

Список використаних літературних джерел

1. Півторак Д.О. Визначення рівня деформацій за вихідним сигналом бреггівського волоконно-оптичного датчика / Півторак Д.О., Цибульник С.О., Луців Т.В. // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – №1, 110-114 С.
2. ГОСТ Р53778-2010 Будинки і споруди. Правила обстеження і моніторингу технічного стану.
3. СНиП 3.01.03-84 Геодезичні роботи в будівництві
4. Сучасні методи моніторингу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-metody-monitoringa-tehnicheskogo-sostoyaniya-zdaniya-1>
5. Система моніторингу інженерних конструкцій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.smis-expert.com/wp-content/uploads/2017/10/Prezentatsiya-Sistema-monitoringa-inzhenernyh-konstruktsiy-SMIK.pdf>
6. Мартинюк М. О. Огляд та аналіз сучасних датчиків деформації / Мартинюк М. О., Аксініченко В.О. // Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 4-5 грудня 2018 р.: збірник праць конференції . – Київ: НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2018 – С. 25-28.
7. Акселерометр [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vdmais.ua/akselerometr-dlya-monitoringa-vibronagruzok/>
8. Переваги акселерометрів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sovtest-ate.com/equipment/monitoring/>
9. Інклінометри [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.akv-ia.com/page-articles.html?n=20>
10. Інклінометри [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://life-prog.ru/view_msinv.php?id=15

11. Тахеометри [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://studbooks.net/2078048/geografiya/printsip_raboty_elektronnogo_tacheometra
12. Тензодатчик: опис, конструкція і принцип роботи. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dovidkam.com/remont/elektrika/tenzodatchik-opis-instrukciya-i-princip-roboti.html>
13. Тензодатчики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.asutpp.ru/tenzodatchik.html>
14. Датчики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%94%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA_%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%83
15. Волоконно-оптичні датчики . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.laser-portal.ru/content_359
16. Оптичні датчики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/3904378/>
17. Мартинюк М. О. Вимірювання напружено-деформованого стану будівельних конструкцій / М. О. Мартинюк, Д. В. Шевчук // Нові напрямки розвитку приладобудування : 10-та Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, 26-28 квітня 2017 р. : тези доповідей і виступів. – Мінськ : БНТУ, 2017. – С. 7-8.
18. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда. - М.: Техносфера, 2008. - 520 с.
19. Волоконно-оптичні датчики . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.directindustry.com.ru/prod/scaime/product-6999-749487.html>
20. Бреггівські решітки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://monsol.ru/primenenie/baza-znaniy/poleznye-stati/statiya-1/>
21. Волоконно-оптична система [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://journals.nstu.ru/vestnik/download_article?id=11348

22. Fundamentals of Optical Fiber Sensors [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/652329/>
23. Kashyap, R. Fiber Bragg Gratings / R. Kashyap. – San Diego, CA: Academic Press. – 1999. – 478 p
24. 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. – Т. 35. – № 12. – С. 1085-1103.
25. Иванов С.А. Сужение спектральной полосы излучения мощного лазерного диода объемной брэгговской решеткой на фото-термо-рефрактивном стекле [Текст] / С.А. Иванов, Н.В. Никоноров, А.И. Игнатъев и др. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Том 50. – №6. – С. 834-838.
26. Аксініченко В.О. Моделювання волоконно-оптичного датчика / Аксініченко В.О. // Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: XV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 10-11 грудня 2019 р.: збірник праць конференції. – Київ: НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, 2019 – С. 18-21.
27. Датчик тиску. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://clc.am/wscrMA>
28. Датчики деформації. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studopedia.info/5-35478.html>
29. Tsarev A. V. Compact acousto-optic interrogator for fiber optic Bragg sensors / A. V. Tsarev [et al.] // International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices. Rome (Italy). - 2011. - P. 83-84.
30. Allan W. R. Multiplexed Fiber Bragg Grating Interrogation System Using a Microelectromechanical Fabry-Perot Tunable Filter / W. R. Allan [et al.] // IEEE Sensors Journal. - 2009. - Vol. 9, Issue 8. - P. 936-943.

31. Иванов С.А. Сужение спектральной полосы излучения мощного лазерного диода объемной брэгговской решеткой на фото-термо-рефрактивном стекле [Текст] / С.А. Иванов, Н.В. Никоноров, А.И. Игнатьев и др. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Том 50. – №6. – С. 834-838.

32. Луців Т.В. Моделювання масиву брегівських датчиків для визначення поверхневої деформації інженерних споруд / Луців Т.В., Півторак Д.О., Цибульник С.О. // Приладобудування 2016: стан і перспективи: Збірник тез доповідей XIV Міжнародної науково-технічної конференції / Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2016. – С. 32-33.

33. Свідоцтво №65688 України про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Програма реалізації принципу роботи брегівських волоконно-оптичних датчиків при різних рівнях деформації» [Текст] Лакоза С.Л., Цибульник С.О., Півторак Д.О., Луців Т.В. (Україна); заявник та власник Лакоза С.Л., Цибульник С.О., Півторак Д.О., Луців Т.В. - №66080; заявл. 25.03.2016; зареєстровано 27.05.2016 р. в Державному реєстрі свідотств про реєстрацію авторського права на твір.

ДОДАТКИ

Додаток А

%задання границь по довжині хвилі

x=1510e-9:0.001e-9:1600e-9;

%задання коефіцієнтів

p11=0.113; p12=0.252;

v=0.16; n=1.4682;

al_1 = 1.05e-6; % коефіцієнт лінійного розширення.

al_n=8.6e-6; % термооптичний коефіцієнт.

pe=n*(p12-v*(p11+p12))/2; % 2.12 формула, стр52, изм. длины волны по деформации

%задання довжини решітки Брегга

L=[1555e-9 1555e-9 1555e-9 1555e-9 1555e-9];

% L=1540e-9:5e-9:1560e-9;

%задання деформації

%e=15e-4;

e=30e-4:30e-4:150e-4

delT= 24e-4

%-----

%розрахунок зсуву довжини хвилі

dL=L*(1-pe).*e+(al_1 + al_n).*delT

%реалізація сигналу джерела випромінювання

y_dz=gaussmf(x, [10e-9, L(3)]);

%масштабування сигналу відбивання

y_max_vidz_1=gaussmf(L(1)+dL(1), [10e-9, L(3)]);

y_max_vidz_2=gaussmf(L(2)+dL(2), [10e-9, L(3)]);

```

ymax_vidz_3=gaussmf(L(3)+dL(3), [10e-9, L(3)]) ;
ymax_vidz_4=gaussmf(L(4)+dL(4), [10e-9, L(3)]) ;
ymax_vidz_5=gaussmf(L(5)+dL(5), [10e-9, L(3)]) ;
ymax_vidz1_1=gaussmf(L(1), [10e-9, L(3)]) ;
ymax_vidz1_2=gaussmf(L(2), [10e-9, L(3)]) ;
ymax_vidz1_3=gaussmf(L(3), [10e-9, L(3)]) ;
ymax_vidz1_4=gaussmf(L(4), [10e-9, L(3)]) ;
ymax_vidz1_5=gaussmf(L(5), [10e-9, L(3)]) ;

```

%реалізація сигналу відбивання

```

y_vidz2_1=ymax_vidz_1*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(1)+dL(1)]) ;
y_vidz2_2=ymax_vidz_2*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(2)+dL(2)]) ;
y_vidz2_3=ymax_vidz_3*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(3)+dL(3)]) ;
y_vidz2_4=ymax_vidz_4*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(4)+dL(4)]) ;
y_vidz2_5=ymax_vidz_5*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(5)+dL(5)]) ;
y_vidz1_1=ymax_vidz1_1*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(1)]) ;
y_vidz1_2=ymax_vidz1_2*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(2)]) ;
y_vidz1_3=ymax_vidz1_3*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(3)]) ;
y_vidz1_4=ymax_vidz1_4*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(4)]) ;
y_vidz1_5=ymax_vidz1_5*0.9*gaussmf(x, [0.1e-9, L(5)]) ;

```

%-----

%виведення графіків моделювання

```

figure(1)
plot(x,y_dz , 'k-', 'LineWidth', 3),(set(gca,'fontsize', 20)),grid;
xlabel('Довжина хвилі, м')
ylabel('Інтенсивність випромінювання, УО')
title('Графік вихідного сигналу джерела випромінювання ')

```

%при змінній деформації

```

figure(2)
plot(x,y_vidz1_1,'k-',x,y_vidz2_1,'-',x,y_vidz2_2,'-',x,y_vidz2_3,'-',x,y_vidz2_4,'-', x,y_vidz2_5,'-',
      'LineWidth', 2),(set(gca,'fontsize', 20)),grid;
xlabel('Довжина хвилі, м')
ylabel('Інтенсивність випромінювання, УО')
title('Графік сигналу зафіксованого детектором')

```

```

legend('\lambda_1,          м','\lambda_1+\delta\lambda_1,          м','\lambda_2+\delta\lambda_2,
      м','\lambda_3+\delta\lambda_3, м','\lambda_4+\delta\lambda_4, м',...
      '\lambda_5+\delta\lambda_5, м')

```

%при змінній деформації

```
figure(3)
```

```
y3_1=y_dz-y_vidz1_1;
```

```
y3_2=y_dz-y_vidz1_2;
```

```
y3_3=y_dz-y_vidz1_3;
```

```
y3_4=y_dz-y_vidz1_4;
```

```
y3_5=y_dz-y_vidz1_5;
```

```
y3_n1=y_dz-y_vidz2_1;
```

```
y3_n2=y_dz-y_vidz2_2;
```

```
y3_n3=y_dz-y_vidz2_3;
```

```
y3_n4=y_dz-y_vidz2_4;
```

```
y3_n5=y_dz-y_vidz2_5;
```

```

plot(x,y3_1,'k-',x,y3_n1,'-.',x,y3_n2,'-.',x,y3_n3,'-.',x,y3_n4,'-.',x,y3_n5,'-.',
      'LineWidth',
      2),(set(gca,'fontsize', 20)),grid

```

```
xlabel('Довжина хвилі, м')
```

```
ylabel('Інтенсивність випромінювання, УО')
```

```
title('Графік вихідного сигналу брегтівського датчика')
```

```

legend('\lambda_1,          м','\lambda_1+\delta\lambda_1,          м','\lambda_2+\delta\lambda_2,
      м','\lambda_3+\delta\lambda_3, м','\lambda_4+\delta\lambda_4, м',...
      '\lambda_5+\delta\lambda_5, м')

```

%проведення деференціювання

```
dY_1=diff(y3_1)./diff(x);
```

```
dY_2=diff(y3_2)./diff(x);
```

```
dY_3=diff(y3_3)./diff(x);
```

```
dY_4=diff(y3_4)./diff(x);
```

```
dY_5=diff(y3_5)./diff(x);
```

```
dY_n1=diff(y3_n1)./diff(x);
```

```
dY_n2=diff(y3_n2)./diff(x);
```

```
dY_n3=diff(y3_n3)./diff(x);
```

```
dY_n4=diff(y3_n4)./diff(x);
```

```
dY_n5=diff(y3_n5)./diff(x);
```

%Знаходження точок екстремумів

```
i_1 = find( abs(diff(sign(dY_1)))==2 );  
i_2 = find( abs(diff(sign(dY_2)))==2 );  
i_3 = find( abs(diff(sign(dY_3)))==2 );  
i_4 = find( abs(diff(sign(dY_4)))==2 );  
i_5 = find( abs(diff(sign(dY_5)))==2 );  
i_n1 = find( abs(diff(sign(dY_n1)))==2 );  
i_n2 = find( abs(diff(sign(dY_n2)))==2 );  
i_n3 = find( abs(diff(sign(dY_n3)))==2 );  
i_n4 = find( abs(diff(sign(dY_n4)))==2 );  
i_n5 = find( abs(diff(sign(dY_n5)))==2 );
```

%знаходження мінімумів вихідного сигналу бреггівського датчика

```
x_L1=x(i_1(2)-1);  
x_L2=x(i_2(2)-1);  
x_L3=x(i_3(2)-1);  
x_L4=x(i_4(2)-1);  
x_L5=x(i_5(2)-1);  
x_L_n1=x(i_n1(2)-1);  
x_L_n2=x(i_n2(2)-1);  
x_L_n3=x(i_n3(2)-1);  
x_L_n4=x(i_n4(2)-1);  
x_L_n5=x(i_n5(2)-1);
```

%знаходження зсуву довжини хвилі

```
dxL_1=abs(x_L1-x_L_n1);  
dxL_2=abs(x_L2-x_L_n2);  
dxL_3=abs(x_L3-x_L_n3);  
dxL_4=abs(x_L4-x_L_n4);  
dxL_5=abs(x_L5-x_L_n5);
```

%знаходження деформації

```
E_1=dxL_1/(L(1)*(1-pe))  
E_2=dxL_2/(L(2)*(1-pe))  
E_3=dxL_3/(L(3)*(1-pe))  
E_4=dxL_4/(L(4)*(1-pe))  
E_5=dxL_5/(L(5)*(1-pe))
```

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕНЕДЖМЕНТУ І МАРКЕТИНГУ



Інженерна Компанія
ТЕХНОПОЛІС



*XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів,
аспірантів та молодих вчених*

"ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ"

10-11 грудня 2019 р.
м. Київ, Україна

Збірник праць конференції



КИЇВ 2019

УДК 681.786

*В.О. Аксініченко, ст. гр ПГ-81мп, к.т.н. Д.О. Півторак,
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА

Анотація. У даній роботі приведена математична модель волоконно-оптичного датчика деформацій. Промодельовано роботу волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток при впливі деформації та температури.

Ключові слова: датчик деформації, волоконно-оптичний датчик.

ВСТУП

У процесі експлуатації інженерні і будівні споруди знаходяться під впливом природних або техногенних факторів, які можуть привести до виникнення мікротріщин або пластичних деформацій. Такі дефекти можуть привести до погіршення технічного стану або руйнування споруди. Моніторинг і діагностика поточного технічного стану об'єкта, а також прогнозування його зміни на сьогоднішній день являються найбільш ефективними способами попередження руйнування інженерних та будівних споруд.

Моніторинг і діагностика проводяться як на стадіях будівництва, капітального ремонту, реконструкції, так і на стадії експлуатації інженерних та будівних споруд. Завдяки своїм особливостям нечутливість до зовнішніх електромагнітних полів, вибухо- та пожежобезпечність, низькі оптичні втрати, висока корозійна стійкість, мала маса та розмір, низька вартість, висока міцність та гнучкість для здійснення моніторингу все частіше використовуються волоконно-оптичні датчики. По принципу дії ці вимірювальні перетворювачі діляться на шість типів: амплітудні, фазові, поляризаційні, частотні, спектральні та тунельні.

Із всіх різновидів волоконно-оптичних датчиків, придатних для виміру деформації, бреггівські датчики (частотні) мають найкращу швидкодію та є найбільш стійкими до зовнішніх впливів. Тому найбільш перспективними датчиками для вимірювання деформації є волоконно оптичні датчики на основі бреггівських решіток (ВОДОБР). В їх основу закладений принцип вузькополосного відбиття оптичного випромінення від періодичної структури показника переломлення, сформованою безпосередньо в фоточутливій серцевині оптичного волокна [1].

ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ДЕФОРМАЦІЇ ПО ВИХІДНОМУ СИГНАЛУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА

Довжина хвилі оптичного випромінювання, відбитого бреггівськими решітками, залежить від періоду решітки та ефективного показника заломлення. Зміщення довжини хвилі Брега в ту чи іншу сторону являється показником наявності деформації об'єкта в точці знаходження датчика і знаходиться за наступною формулою:

$$\Delta\lambda_{БР} = \lambda_{БР} \left(1 - \frac{n_{енн}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right) \varepsilon_z + (\alpha_\lambda + \alpha_n) \Delta T, \quad (1)$$

Перший доданок формули (1) характеризує залежність зсуву довжини хвилі відбитого випромінювання від деформації [2], де p_{11} і p_{12} – коефіцієнти Поккельса в тензорі оптичних напруг, n_{eff} – ефективний показник заломлення, ν – коефіцієнт Пуассона. Для типового оптичного волокна $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$, $n_{\text{eff}} = 1,4682$ та $\lambda_{\text{BR}} = 1500$ нм.

Другий доданок формули (1) відповідає залежності зміщення довжини хвилі від температури, де α_{λ} – температурний коефіцієнт лінійного розширення ($\alpha_{\lambda} = 0,55 \cdot 10^{-6}$ для плавленого кварцу), α_n – термооптичний коефіцієнт ($\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6}$ для оптичного волокна з легованим германієм)[3].

Довжина хвилі випромінювання, відбитого від бреггівських датчиків, змінюється залежно від температури через теплове розширення оптичного волокна (подовжується період бреггівської решітки), так як відбувається зміна механічної довжини решітки, а також зміна показника заломлення волокна в залежності від температури (змінює оптичну довжину решітки)[2].

Для визначення відносної рівня деформації по вихідному сигналу волоконно-оптичного датчика на основі решіток Брега використовується програмний пакет MatLab.

Для дослідження характеристик датчика штучно задається деформація. Рівень деформації задається $\varepsilon = 15 \cdot 10^{-4}$.

При цьому вхідний сигнал, який генерується джерелом випромінювання подається на бреггівський датчик по оптоволоконному світоводу, сигнал являє собою світловий промінь [4] із такою спектральною характеристикою, як показано на рис.1. Даний сигнал піддається Гаусівському нормальному розподілу [1].

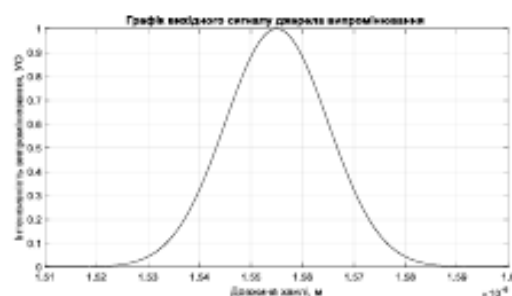


Рисунок 1. Модель вхідного сигналу

З врахуванням першого доданку формули (1) та з заданою $\Delta T = 0$ при пропусканні сигналу джерела випромінювання через бреггівський ВОД частина спектру проходить, а інша частина сигналу, що відбивається та фіксується спектральним аналізатором (детектором). При деформації пік відбитого спектру зміщується відносно початкового значення при якому датчик не зазнавав впливу деформації.

На рис. 2 представлено залежність коефіцієнта відбиття від довжини хвилі при різних значеннях параметра деформації

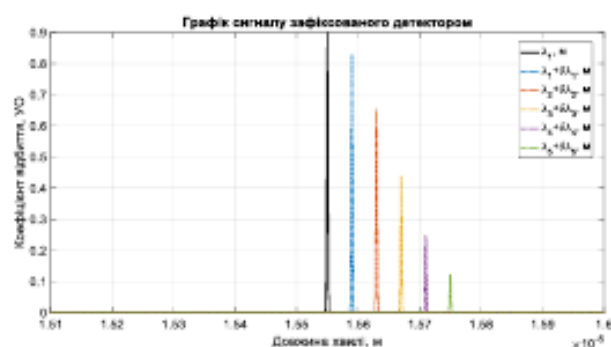


Рисунок 2. Графік відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

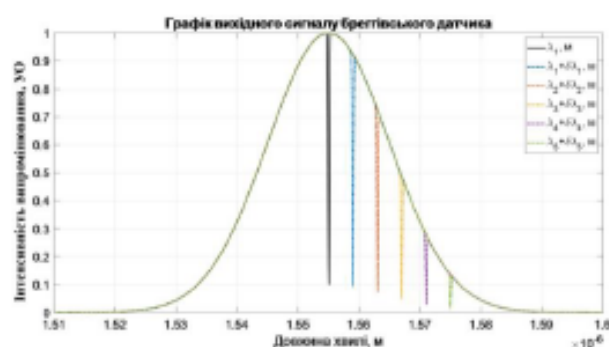


Рисунок 3. Модель вихідного сигналу бреггівського датчика

Спектр, який пройшов через волоконну бреггівську решітку характеризує собою різницю сигналів вхідного спектру, який зображений на рис.1 та відбитого спектру, який представлений на рис. 2. Графік представляє залежність коефіцієнта відбиття від довжини хвилі при різних значеннях параметру деформації. На рис.3 представлений вихідний сигнал волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток.

Згідно формули (1), зміна температури задається $\Delta T = 24 \cdot 10^{-4}$.

Модель вхідного сигналу представлена на рис. 1. Модель відбитого сигналу, який показує залежність коефіцієнта відбиття від довжини хвилі при різних значеннях деформації представлений на рис. 4 (а, б).

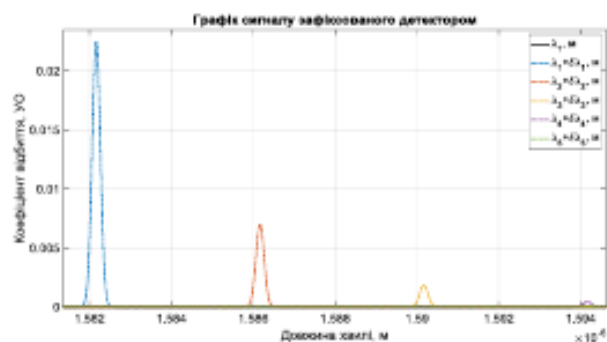
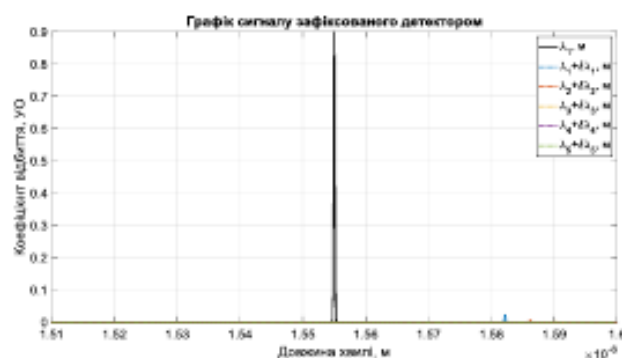


Рисунок 4. а) Графік відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором;
б) Масштабований графік відбитого сигналу випромінювача зафіксованого детектором

Модель вихідного сигналу зображена на рис.5, яка представляє різницю сигналу випромінювання та відбитого сигналу при деформації та впливі температури.

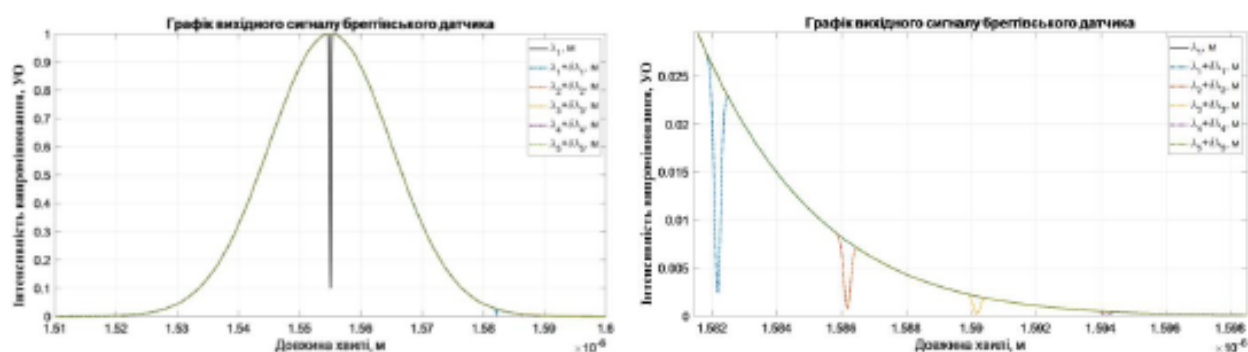


Рисунок 5. а) Графік вихідного сигналу ВОД;
б) Масштабований графік вихідного сигналу ВОД

Таким чином, з графіків представлених на рис. 3 (без урахування температурної складової) та рис. 5 можна зазначити, що температурна складова збільшує зсув довжини хвилі на близько 0.02 мкм.

ВИСНОВОК

В даній роботі проведено математичне моделювання поведінки волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських решіток для випадків: з окремим урахуванням деформації та деформацією під впливом температурної складової. Отримані залежності показують, що температурна складова має значний вплив на зсув довжини хвилі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Пивторак Д.А. Определение уровня деформаций по выходному сигналу брегговского волоконно-оптического / Пивторак Д.А., Цыбульник С.А., Луцив Т.В. // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – №1, 110-114 С.
- [2] 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. – Т. 35. – № 12. – С. 1085-1103.
- [3] Оптичні коефіцієнти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: cutt.ly/PeVYF1w
- [4] Иванов С.А. Сужение спектральной полосы излучения мощного лазерного диода объемной брегговской решеткой на фото-термо-рефрактивном стекле [Текст] / С.А. Иванов, Н.В. Никоноров, А.И. Игнатьев и др. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Том 50. – №6. – С. 834-838. [0]

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ПРИЛАДОБУДІВНИЙ
ФАКУЛЬТЕТ**



**ФАКУЛЬТЕТ МЕНЕДЖМЕНТУ І
МАРКЕТИНГУ**



*XIV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів,
аспірантів та молодих вчених*

"ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ"

4-5 грудня 2018 р.
м. Київ, Україна

Збірник праць конференції



КИЇВ 2018

УДК 621.372

*М.О. Мартинюк, студент гр. ПГ-71мп, В.О. Аксініченко, ст. гр ПГ-81мп
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДАТЧИКІВ ДЕФОРМАЦІЇ

Анотація. У даній роботі приведені способи виміру деформацій, проаналізовані датчики деформації, їх переваги та недоліки. З проведеного аналізу показано, що найбільш доцільним є використання волоконно-оптичного датчика.

Ключові слова: датчик деформації, тензодатчик, волоконно-оптичний датчик, пневматичний датчик, п'єзоелектричний датчик, магнітопружний датчик.

ВСТУП

У процесі контролю технічного стану конструкцій широко впроваджується моніторинг напружено-деформованого стану, який включає в себе оцінку деформації чи інших параметрів матеріалу, викликаних механічною напругою в об'єкті контролю.

Існують різні способи виміру деформації, які можна поділити на:

1. Оптичні. Засновані на вимірюванні малих зміщень поверхні, які реєструються, наприклад, інтерференційними методами, методами муарових візерунків та ін.

2. Пневматичні. Засновані на вимірюванні тиску стисненого повітря в соплі, що прилягає до поверхні досліджуваної деталі.

3. Акустичні. Засновані на вимірюванні змін акустичних параметрів матеріалу (швидкість звуку, акустичний опір, загасання) при дії навантажень. Ці зміни можуть бути виміряні п'єзоелектричними датчиками.

4. Електричні. Використовують зміну електричних параметрів матеріалу чутливого елементу тензодатчика при дії навантажень, як правило, зміни електричного опору або генеруючі напруги при деформаціях (п'єзоелектричні). Недолік останніх – непридатність для вимірювання статичних деформацій, але їм властива висока чутливість.

5. Рентгенівські. Засновані на вимірюванні міжатомних відстаней у кристалічній решітці матеріалу досліджуваного об'єкта [1].

ВИДИ ДАТЧИКІВ ДЕФОРМАЦІЇ

Датчик деформації перетворює величину деформації в електричний сигнал. Його можна використовувати не тільки за прямим призначенням, але й для вимірювання різних параметрів, та у багатьох інших датчиках, як проміжний елемент [2].

Тензодатчик або тензорезистор. Основний первинний пристрій, який перетворює фізичну величину в нормований електричний сигнал. При розтязі або стисненні чутливих елементів тензорезистора змінюється їх довжина та поперечний переріз, що в свою чергу, збільшує та зменшує опір відповідно. Тензодатчик приведено на рис. 1 [3].



Рисунок 1. Тензодатчик

До основних переваг належать: сприйняття всіх деформацій зовнішнього волокна деталі, реагування на стиск або розтяг, невеликі розміри (безінерційні), можливе розміщення у важкодоступному місці, не спотворюють інформацію,

сумісність з вимірами напруги. Маючи такі переваги, тензорезистори набули значного поширення.

До основних недоліків належать: втрата чутливості при критичних перепадах температури та мала зміна опору, через що, під час вимірювання, використовують вимірювальні схеми з високою чутливістю. Датчики можуть включатися в мостові та потенціометричні схеми для вимірювання різноманітних деформацій. При використанні тензодатчиків, можливо вимірювати як статичні, так і динамічні деформації [3].

Пневматичний або датчик тиску. Прилад складається з первинного перетворювача тиску, у склад якого входить чутливий елемент з приймачем тиску, схема вторинної обробки та пристрій виводу, розміщені у корпусі. В таких датчиках створене ними зусилля, яке в свою чергу, через передавальні механізми переходить в кутове або лінійне переміщення стрілки на шкалі приладу, або деформація пружних чутливих елементів визначає тиск. На рис. 2 зображено датчик тиску Сапфір-22МТ [4].



Рисунок 2. Датчик тиску Сапфір-22МТ

Основна відмінність даних датчиків є точність, з якою прилад реєструє тиск, яка залежить від принципу перетворення тиску в електричний сигнал [4].

П'єзоелектричний датчик. В основі його роботи стоїть п'єзоелектричний ефект. Коли до п'єзоелектрику прикладається механічне напруження, він поляризується в зазначеному напрямку, і між його гранями з'являється електрична різниця потенціалів. Величина механічної напруги, прикладеного до кристалу, прямо пов'язана з величиною його деформації, а, отже, і з різницею потенціалів між його гранями. Це дозволяє по виміряній величині напруги дізнатися величину діючої на п'єзокристал сили. П'єзоелектричний датчик використовується для виміру швидкозмінного тиску, якщо тиск змінюється не достатньо швидко, то зростає похибка перетворення через перехід електричного заряду з пластин до корпусу. Якщо п'єзоелектрик деформувати, і залишити його в цьому стані, то напруга між обкладками зменшиться через осідання на них іонів повітря і струму, що протік через систему реєстрації. Таким чином, при незмінній деформації п'єзоелектрика напруга між обкладками буде зменшуватися, поки не досягне

нуля. Тому п'єзодатчик (рис. 3) зручний у використанні тільки при вимірі відносно швидких деформацій [5].



Рисунок 3. П'єзоелектричний датчик

Високі динамічні характеристики та здатність сприймати коливання тиску з частотою від десятків Гц до десятків МГц – це

є основними перевагами п'єзоелектричних датчиків. Застосовуються при вимірах вібрацій і деформацій, а також тензометричних вимірах, у вагових і сортувальних (по вазі) пристроях, тощо [6].

Магнітопружний датчик або магнітострикційний датчик (рис. 4). Це прилад, що вимірює та перетворює механічні деформації або тиск в електричний сигнал. В основі роботи датчика є використання залежності магнітних характеристик таких матеріалів, як пермалой чи інвар, від їх механічної напруги. Такий датчик оптимально використовувати для виміру як постійних, так і швидкозмінних малих деформацій у твердих тілах, для виміру тиску рідин або газів, коли необхідна висока чутливість вимірів, але при втратах точності [6].



Рисунок 4. Магнітострикційний датчик з цифровим виходом [7]

Волоконно-оптичні датчики (рис. 5). Основний принцип роботи полягає в тому, що світло проходячи через оптичне волокно від лазера або суперлюмінесцентного оптичного джерела, зазнає слабких змін своїх параметрів у волокні чи в одній або декількох бреггівських решітках, які оцінюються в схемі детектування [9]. Основні властивості це 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 в порівнянні з дорогими аналогами.



Рисунок 5. Волоконно-оптичний датчик [8]

До недоліків належить непрактичне застосування багатомодових оптичних волокон в когерентних лініях зв'язку, через невелику швидкість передачі інформації [6].

ВИСНОВОК

Розглянувши вищезазначені види датчиків та їхні характеристики, можна зробити висновок, що волоконно-оптичні датчики мають найбільшу кількість переваг, можливість використання в різноманітних задачах, задовольняють критерій цінність-ефективність, володіючи оптимальним поєднанням характеристик.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартинюк М. О. Вимірювання напружено-деформованого стану будівельних конструкцій / М. О. Мартинюк, Д. В. Шевчук // Нові напрямки розвитку приладобудування : 10-та Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, 26-28 квітня 2017 р. : тези доповідей і виступів. – Мінськ : БНТУ, 2017. – С. 7-8.
2. Датчики деформації. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studopedia.info/5-35478.html>
3. Тензодатчик: опис, конструкція і принцип роботи. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dovidkam.com/remont/elektrika/tenzodatchik-opis-instrukciya-i-princip-roboti.html>
4. Датчик тиску. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://clc.am/wscrMA>
5. П'єзодатчики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.heuristic.su/effects/catalog/tech/byId/description/729/index.html>
6. Медичні датчики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/3904378/>
7. Магнітострикційний датчик з цифровим виходом [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://clc.am/ONSrNg>
8. Волоконно-оптичний датчик . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.directindustry.com.ru/prod/scaime/product-6999-749487.html>
9. Волоконно-оптичні датчики . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.laser-portal.ru/content_359

Наук. керівник – к.т.н. Півторак Д.О.