

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ СЕНСОР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ
МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи МТІОЛСу-22-1
Сергій ШМАТЬКО
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія
оптоінформаційних та лазерних систем»
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. каф. ФОЕТ Сергій КУХТІН
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Фізичних основ електронної техніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Шматьку Сергію Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Волоконно-оптичний сенсор для вимірювання механічних напружень

затверджена наказом університету від «23» травня 2025 р. № 409 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15 липня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: аналітичні моделі оптоволоконних сенсорів; фізичні закономірності поширення світла в оптичному волокні; параметри температурної чутливості структури Брега; графічні дані залежностей довжини хвилі Брега від температури; експериментальні характеристики сенсорів різних типів для порівняння.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____

1 Аналіз фізичних властивостей оптичного волокна та принципів дії оптоволоконних сенсорів. 2 Моделювання температурного сенсора на основі решітки Брега. 3 Побудова спектральної залежності довжини хвилі Брега від температури. 4 Оцінка точності вимірювань та порівняння з іншими типами сенсорів. 5 Обґрунтування вибору структури для прототипу та його застосування в умовах практичного середовища.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал – 11 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про оптоволоконні сенсори	06.05.25–21.05.25	Виконано
2	Аналіз фізичних принципів дії оптоволоконних сенсорів, зокрема решіток Брега, інтерферометричних і розподілених структур.	22.05.25–30.05.25	Виконано
3	Моделювання температурного сенсора на основі структури Брега, побудова графіків залежності та верифікація формул.	02.06.25–11.06.25	Виконано
4	Обробка результатів моделювання та порівняння ефективності FBG-сенсора з іншими типами температурних датчиків.	12.06.25–17.06.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18.06.25–27.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	28.06.25–02.07.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	03.07.25–11.07.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	12.07.25–13.07.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	14.07.25–16.07.25	

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ ст. викл. каф. ФОЕТ Сергій КУХТІН
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 46 с., 21 рис., 5 табл., 21 джерело, 1 додаток.

ДОВЖИНА ХВИЛІ, МЕХАНІЧНЕ НАПРУЖЕННЯ, ОПТОВОЛОКНО, РЕШІТКА БРЕГА, СЕНСОРИ, СПЕКТРАЛЬНА ЧУТЛИВІСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА.

Об'єкт дослідження – оптоволоконні сенсори на основі брегівських решіток для вимірювання температури та механічних напружень.

Мета роботи – дослідити конструктивні особливості, принципи дії та характеристики волоконно-оптичних сенсорів, зокрема брегівських, з акцентом на їхню здатність реагувати на зовнішні фізичні впливи.

Метод дослідження – аналітичний огляд, порівняльний аналіз і узагальнення наукових джерел.

У роботі розглянуто основні фізичні властивості та типи оптичного волокна, класифікацію оптоволоконних сенсорів за принципом дії, конструкцією та призначенням. Особливу увагу приділено брегівським волоконним сенсорам, їхньому спектральному зсуву, температурній та деформаційній чутливості. Наведено ключові формули, що описують залежності довжини хвилі Брега від зовнішніх впливів. Робота узагальнює знання щодо застосування FBG-сенсорів у практиці та демонструє їх переваги в точності, стабільності та мультиплексуванні.

Отримані результати можуть бути корисними для побудови сучасних сенсорних систем моніторингу в енергетиці, будівництві, транспорті та біомедичній галузі.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 46 p., 21 fig., 5 tables, 21 sources, 1 appendix.

BRAGG GRATING, MECHANICAL STRAIN, OPTICAL FIBER, SENSORS, SPECTRAL SENSITIVITY, TEMPERATURE, WAVELENGTH.

Object of research – fiber-optic sensors based on Bragg gratings for measuring temperature and mechanical strain.

Purpose of the work – to study the design features, operating principles, and characteristics of fiber-optic sensors, particularly those based on Bragg gratings, with an emphasis on their response to external physical influences. Research method – analytical review, comparative analysis, and synthesis of scientific sources.

The work examines the main physical properties and types of optical fibers, as well as the classification of fiber-optic sensors by operating principle, design, and purpose. Special attention is given to Bragg grating-based fiber sensors, their spectral shift, and sensitivity to temperature and strain. Key formulas describing the Bragg wavelength shift under external influences are presented. The work summarizes current knowledge on the application of FBG sensors and demonstrates their advantages in terms of accuracy, stability, and multiplexing capability.

The obtained results can be useful for the development of modern monitoring systems in energy, construction, transportation, and biomedical fields.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Теоретичні основи та принципи роботи оптоволоконних сенсорів	9
1.1 Поняття оптичного волокна. Області застосування	9
1.2 Класифікація оптичного волокна та його основні характеристики.....	12
1.3 Класифікація оптоволоконних сенсорів: за фізичними принципами та призначенням.....	15
1.4 Огляд типів волоконних сенсорів. Стисла історія розвитку	19
2 Брегівські волоконні датчики для вимірювання механічних напружень і температури	30
2.1 Принцип роботи та вплив механічних напружень	30
2.2 Температурна чутливість і конструктивні особливості	33
3 Розрахунок моделювання Брегівського датчика для вимірювання механічних деформацій	37
3.1 Теоретичний опис FBG-сенсора та основні формули.....	37
3.2 Приклади застосування, моделювання та температурна компенсація.....	40
Висновки	44
Перелік джерел посилання	45
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	47

ВСТУП

Упродовж останніх десятиліть оптоволоконні сенсори впевнено зайняли свою нішу в сучасних технологіях контролю, моніторингу та автоматизації. Їх поява стала результатом стрімкого розвитку фотоніки, телекомунікацій та матеріалознавства, які сформували нову парадигму у вимірювальній техніці. З появою на ринку надійних та дешевших елементів оптоволоконного зв'язку – таких як лазерні діоди, фотодетектори, мультиплектори – стало можливим створення сенсорних систем нового покоління. Оптоволоконні сенсори перетворились із експериментальних зразків у широко застосовувані інженерні рішення в багатьох галузях. Основною передумовою до зростання популярності таких сенсорів є їх унікальні фізичні властивості, зумовлені природою самого оптичного волокна. Скляне волокно, яке транспортує світлові хвилі на великі відстані з мінімальними втратами, може не лише передавати інформацію, але й бути активним елементом, що реагує на зміну температури, тиску, деформації, електромагнітних полів, вібрацій чи хімічного складу середовища. Інформація про зміну фізичного параметру фіксується як зміна інтенсивності, фази, частоти або спектру світла, що проходить через волокно, і може бути зчитана за допомогою спеціалізованих оптико-електронних пристроїв.

Особливо актуальним використання оптоволоконних сенсорів стало у критичних інфраструктурах, де традиційні електронні або механічні датчики є ненадійними через вплив сильних електромагнітних завад, вологості, температурних перепадів або вибухонебезпечних умов. Наприклад, в авіації, оборонній промисловості, атомній енергетиці та нафтогазовому секторі використовуються саме оптоволоконні рішення завдяки їх пасивності (відсутності електричних елементів у чутливій частині), високій точності та здатності до віддаленого моніторингу.

Крім того, такі сенсори добре підходять для побудови розподілених систем. Це означає, що по одній оптичній лінії можна встановити десятки або навіть сотні сенсорних вузлів, що здатні вимірювати параметри одночасно в різних точках – наприклад, по всій довжині мосту чи трубопроводу. З огляду на це, оптоволоконні сенсори стали ключовим компонентом концепції «розумних» конструкцій та структурного моніторингу. Важливо також відзначити, що оптоволоконні сенсори поділяються на дві фундаментальні категорії: екструдовані (extrinsic), де світло модулюється за межами волокна, та інтегровані (intrinsic), в яких взаємодія між світлом і зовнішнім середовищем відбувається всередині самого волокна. Обидва типи мають свої особливості, і вибір конкретного рішення залежить від задачі, вимог до чутливості, довговічності, габаритів, точності й вартості.

Загалом, оптоволоконна сенсорика – це міждисциплінарна галузь, яка поєднує в собі елементи фізики, оптики, інженерії, обробки сигналів, комп'ютерних технологій та навіть штучного інтелекту. В умовах зростаючих вимог до безпеки, автономності та точності вимірювань, подальший розвиток та впровадження таких систем є не лише перспективним, а й стратегічно важливим кроком у напрямі побудови технологічно стійкої інфраструктури майбутнього.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ ОПТОВОЛОКОННИХ СЕНСОРІВ

1.1. Поняття оптичного волокна. Області застосування

Сенсорні технології на основі оптичного волокна використовують принцип поширення світла у діелектриках. Волокно – це тонкий циліндр зі скла або полімеру, в якому світло транспортується завдяки повному внутрішньому відбиттю між серцевиною з вищим показником заломлення та оболонкою з нижчим. Це дозволяє передавати сигнал на великі відстані з мінімальними втратами.

Оптоволоконні сенсори реагують на зовнішні впливи (температуру, тиск, деформацію тощо), які змінюють траєкторію або характеристики світла – інтенсивність, фазу, поляризацію чи спектр. Ці зміни реєструються спеціальними пристроями для визначення фізичних величин.

Усі оптоволоконні сенсори за принципом роботи умовно поділяються на екструзійні (*extrinsic*) та інтринсивні (*intrinsic*). У першому випадку волокно лише транспортує світло до/від чутливого елемента, розташованого зовні (наприклад, мікромеханічна система або дзеркало). В інтринсивних сенсорах саме волокно виступає активним елементом – його деформація чи інші впливи безпосередньо змінюють параметри світла. Однією з найпростіших технологій є інтенсивнісна модуляція, де зміна зазору або вигин волокна впливають на кількість переданого світла. Більш точні сенсори працюють за інтерферометричними схемами (Маха–Цендера, Мішельсона, Сагнака), в основі яких – інтерференція хвиль, чутлива до фазових зрушень, викликаних деформаціями. Такі сенсори здатні фіксувати надзвичайно малі зміни – до мікространів [1].

Ще одним поширеним типом є сенсори, побудовані на волоконних решітках Брега (FBG). Це періодичні зміни показника заломлення в серцевині волокна, які відбивають світло певної довжини хвилі. Якщо на волокно діє зовнішній вплив, решітка розтягується або стискається, що

змінює відбиту довжину хвилі. Таким чином, аналізуючи зсув спектру, можна визначити ступінь впливу. Ці сенсори особливо цінні у структурному моніторингу, адже можуть бути вбудовані безпосередньо в матеріали (бетон, композити) та працювати роками без втручання.

У сучасних системах часто використовуються спектральні сенсори, які реагують на зміну довжини хвилі або спектрального складу світла під впливом середовища. Наприклад, сенсори температури можуть базуватись на ефекті чорного тіла, а хімічні сенсори — на флуоресценції або поглинанні світла певними речовинами. Такі сенсори ефективно застосовуються в медицині, хімічній та харчовій промисловості.

Не менш важливим є питання мультиплексування – здатності передавати сигнали від багатьох сенсорів через одне волокно. Завдяки методам часового (TDM), спектрального (WDM), частотного (FDM) та поляризаційного мультиплексування стало можливим побудувати великі розподілені мережі вимірювання з високою точністю та роздільною здатністю.

Загалом, оптоволоконні сенсори – це потужний інструмент для вимірювання широкого спектру параметрів у найрізноманітніших умовах. Їх теоретичні основи базуються на глибоких принципах оптики, квантової механіки та хвильової фізики, а інженерні рішення реалізують ці принципи у компактних і надійних пристроях.

1.1 Поняття оптичного волокна. Області застосування

Розвиток оптоволоконних технологій став прикладом перетворення наукових знань на інженерні рішення, що змінили підходи до передачі даних та вимірювання у складних середовищах. Хоч перші дослідження з передачею світла через прозорі середовища проводилися ще у 1950-х, справжній прорив відбувся у 1960–1970-х роках після появи лазерів і вдосконалення виробництва надчистого скла. У 1970 році компанія Corning створила

волокно з втратою менше 20 дБ/км, зробивши оптоволокно придатним для телекомунікаційного використання [2].

Паралельно з розвитком волоконно-оптичного зв'язку оптичне волокно почали розглядати як сенсорний елемент. У 1977 році з'явилися перші концепції волоконних інтерферометрів, чутливих до деформацій, температури та звуку. Першим практичним прикладом став оптоволоконний гіроскоп на основі інтерферометра Сагнака, який із 1980-х років застосовується в авіації. Оптичне волокно — гнучкий прозорий хвилевід зі скла або полімеру — транспортує світло завдяки повному внутрішньому відбиттю, проходячи великі відстані з мінімальними втратами. Його конструкція включає серцевину й оболонку з різним показником заломлення, а також захисне покриття для механічної стійкості [3].

Оптичне волокно завдяки своїм фізичним властивостям може бути не лише каналом передачі, а й чутливим елементом у сенсорних системах. Зовнішні впливи, такі як температура чи деформація, змінюють характеристики світла у волокні, що дозволяє точно вимірювати ці параметри. Волокна відзначаються мініатюрністю, гнучкістю та стійкістю до агресивних середовищ, тому застосовуються там, де звичайні кабелі неефективні. Сфери використання – зв'язок, лазерна й медична техніка, авіація та сенсорні мережі. Їх функціональність базується на складних фізичних процесах, зокрема взаємодії світлових мод із матеріалом волокна, мікронеоднорідностями і внутрішніми напруженнями [4].

Передача світла у волокні супроводжується втратами, зумовленими абсорбцією, розсіюванням та вигинами. Для їх мінімізації використовують надчисті матеріали, контроль мікроструктури та метод MCVD. Завдяки цьому втрати в одномодовому волокні можуть бути менше 0,2 дБ/км. Також існують волокна зі спеціальними властивостями – градієнтним профілем для зменшення розсіювання мод та волокна, що зберігають поляризацію, необхідні для точних вимірювань, наприклад, в інтерферометричних сенсорах [5].

Також існують фотонно-кристалічні волокна це новітній тип структур, в яких світло поширюється не завдяки відбиттю, а через ефект забороненої зони, що утворюється від періодичних змін показника заломлення. Такі волокна використовуються для створення високочутливих сенсорів, здатних вловлювати найменші коливання температури, хімічного складу середовища або тиску.

У контексті сенсорики надзвичайно важливим є явище еванесцентного поля – тобто частини світлової хвилі, що “виходить” за межі серцевини і проникає в оболонку або навіть у зовнішнє середовище. Саме через цю тонку взаємодію з оточенням світло може "відчувати" зміни у фізичних чи хімічних параметрах поза межами волокна. Використовуючи модифіковані покриття чи гофровані структури, інженери можуть підсилювати цю взаємодію і таким чином перетворювати оптичне волокно на потужний сенсорний інструмент.

Важливою властивістю оптичного волокна є можливість мультиплексування сигналів — передача десятків або сотень каналів із різними параметрами (довжина хвилі, фаза, частота) через одне волокно. Це дозволяє створювати розподілені сенсорні мережі з унікальною ідентифікацією кожного сенсора. Таким чином, волокно слугує не лише каналом зв'язку, а й платформою для зондування середовища, що робить його ключовим елементом сучасних високоточних сенсорних систем [6].

1.2 Класифікація оптичного волокна та його основні характеристики

Оптичні волокна класифікують за кількістю мод (одномодові й багатомодові) та профілем показника заломлення (ступінчасті й градієнтні). Одномодові волокна забезпечують точну передачу сигналу на великі відстані з мінімальною дисперсією, тоді як багатомодові використовуються на коротких відстанях. У ступінчастих волокнах перехід між серцевиною та оболонкою різкий, у градієнтних — плавний, що зменшує дисперсію та покращує якість сигналу, особливо у багатомодових системах [7].

У сенсоричі застосовуються спеціалізовані волокна, як-от ті, що зберігають поляризацію – вони забезпечують стабільність поляризаційного стану, що важливо для гіроскопів та інтерферометрів. Фотонно-кристалічні волокна використовують ефект забороненої зони, мають унікальні спектральні властивості й високу чутливість. Ключові характеристики оптичних волокон – числова апертура, загасання, дисперсія та робочий діапазон довжин хвиль. Найменші втрати досягаються поблизу 1550 нм, що робить цей діапазон оптимальним для сенсорних і телекомунікаційних застосувань [8].

Дисперсія – важливий параметр, що визначає зміну швидкості світла залежно від довжини хвилі та впливає на точність вимірювань. Для її компенсації застосовують спеціальні волокна з нульовою або контрольованою дисперсією. Також критичним є мінімальний радіус згину, особливо в сенсорних застосуваннях. Комплексне розуміння оптичних, геометричних і спектральних властивостей волокна необхідне для правильного вибору типу сенсора та побудови надійної вимірювальної системи [9]. На рис. 1.1 дається опис волокна.

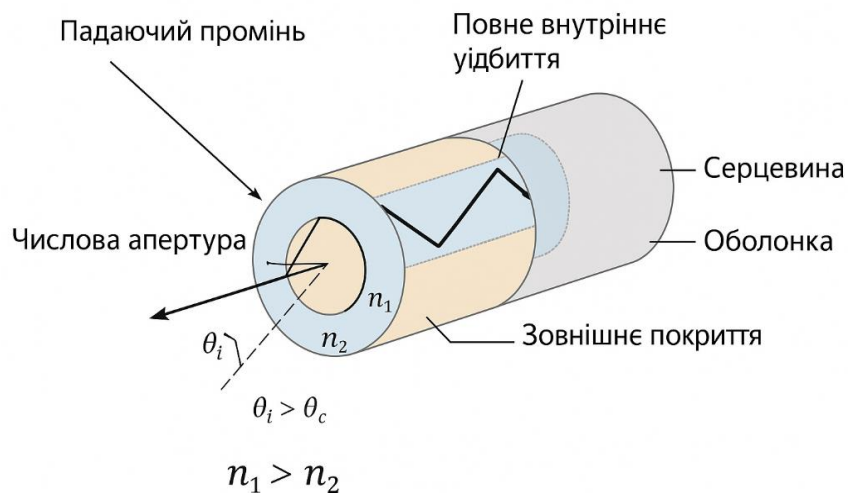


Рисунок 1.1 – Опис волокна

1. Умова повного внутрішнього відбиття

Для утримання світла всередині волокна використовується явище повного внутрішнього відбиття:

$$n_1 > n_2,$$

де n_1 – показник заломлення серцевини волокна;

n_2 – показник заломлення оболонки.

Критичний кут повного внутрішнього відбиття:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

2. Числова апертура (NA – Numerical Aperture).

Числова апертура визначає максимальний кут, під яким промінь може ввійти у волокно та поширюватися всередині:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

3. Коефіцієнт загасання (втрат).

Оптичні втрати у волокні розраховуються за логарифмічною формулою:

$$\alpha L = \frac{10}{L} \times \left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}}\right) \text{ [дБ/км]},$$

де αL – коефіцієнт загасання на довжині хвилі λ ;

L – довжина волокна (в км);

$P_{\text{вх}}, P_{\text{вих}}$ – потужність на вході та виході відповідно.

4. Різниця мод (для одномодових і багатомодових волокон).

Критерій нормалізації (число V) для визначення кількості мод:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot NA,$$

де a – радіус серцевини;

λ – довжина хвилі світла в вакуумі.

Умова одномодовості (для одномодових волокон):

$$V < 2,405.$$

5. Дисперсія.

Загальна дисперсія – це сума хроматичної та модової:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{хр}} + D_{\text{мод}}.$$

Хроматична дисперсія:

$$D_{\lambda} = \frac{d\tau}{d\lambda},$$

де τ – затримка сигналу;

λ – довжина хвилі.

Ці формули відображають фізичні властивості волокна та його здатність передавати світло, що є центральним у підрозділі 1.2. Вони допоможуть тобі пояснити, чим різняться одномодові та багатомодові волокна, як формується напрям поширення сигналу, та які обмеження зумовлені матеріалом волокна.

1.3 Класифікація оптоволоконних сенсорів: за фізичними принципами та призначенням

Класифікація оптоволоконних сенсорів є одним із базових інструментів аналізу та побудови сенсорних систем, оскільки дозволяє виокремити не лише технічні підходи до фіксації змін у середовищі, а й цільову функціональність цих пристроїв. У найзагальнішому вигляді їх можна розглядати крізь призму двох взаємопов'язаних аспектів фізичного принципу роботи та практичного призначення. Ці два критерії не суперечать, а доповнюють один одного, утворюючи багатовимірну систему класифікації.

З фізичної точки зору оптоволоконні сенсори поділяються за тим, які параметри світлової хвилі змінюються внаслідок зовнішнього впливу.

Найпростішим механізмом вважається модуляція інтенсивності світла тобто вимірювання змін у кількості світла, що доходить до приймального пристрою. Такі сенсори зазвичай будуються за схемою відбивання, ослаблення або переривання світлового пучка, що проходить крізь чутливу зону волокна. Хоча цей принцип має обмежену чутливість, він залишається актуальним завдяки простоті реалізації. Більш досконалим є підхід, заснований на фазовій модуляції. У таких сенсорах зміна зовнішніх умов впливає на оптичну довжину шляху, що спричиняє зсув фази світлової хвилі. Інтерференційні структури, як-от конфігурації Маха–Цендера, Мішельсона або Саньяка, фіксують цей зсув, що дозволяє досягати надзвичайно високої точності вимірювання. Сенсори, побудовані на цьому принципі, застосовуються там, де йдеться про виявлення ультратонких механічних змін або мінімальних коливань [10].

Ще однією гілкою класифікації є сенсори, які базуються на зміні довжини хвилі, що відповідає певному резонансному явищу (табл. 1.1). Це, зокрема, сенсори з використанням решіток Бреґа, де зміна періодичності структури волокна або його температури впливає на спектр відбитого сигналу. Такі сенсори дозволяють зчитувати точні значення температури або механічного навантаження за спектральним зсувом, забезпечуючи при цьому мультиплексування можливості використання десятків чутливих точок на одному волокні.

Окрему групу складають сенсори, чутливі до поляризаційного стану світла, який змінюється під дією деформацій або крутильних моментів. Для цього використовуються волокна, що зберігають поляризацію. Такі сенсори застосовуються у високоточних системах позиціонування та акустичних детекторах. За призначенням оптоволоконні сенсори поділяють на температурні, тискові, деформаційні та хімічні. Найпоширеніші — сенсори температури, які контролюють стан трансформаторів, турбін, печей. Сенсори тиску й деформацій важливі в будівництві та енергетиці, де фіксують як

статичні, так і динамічні навантаження. Ефективними виявилися гібридні системи на базі решіток Брега та інтерферометричних схем [11].

Таблиця 1.1 – Класифікація оптоволоконних сенсорів [1]

Фізичний принцип роботи	Тип сенсора	Призначення (що вимірюється)	Приклад застосування
Модуляція інтенсивності	Інтенсивнісні	Наявність або зміна механічного впливу	Виявлення коливань або переміщення (охорона)
Фазова модуляція	Інтерферометричні (Маха–Цендера, Сагнака)	Деформації, акустика, обертання	Гіроскопи, вібраційний контроль трубопроводів
Спектральна зміна	Решітки Брега (FBG)	Температура, напруження, розтяг	Моніторинг мостів, турбін, літаків
Поляризаційна зміна	Поляриметричні	Крутильні деформації, механічний тиск	Виявлення вібрацій або обертання в турбінах
Зміна довжини хвилі при взаємодії	Спектральні, флуоресцентні	Склад газів, хімічні та біологічні речовини	Біосенсори, контроль середовища, аналіз рідин
Розсіювання світла в середовищі	Розподілені (DTS, DAS, DVS)	Температура, акустика, деформації по всій довжині	Геомоніторинг, тунелі, зони сейсмічної активності

Кожен тип оптоволоконного сенсора будується навколо певного оптичного ефекту, який змінює параметри світлової хвилі внаслідок дії зовнішніх фізичних факторів. Наприклад, у фазових сенсорах використовується ефект інтерференції, що дозволяє досягти надзвичайно високої чутливості до змін довжини оптичного шляху. Такі сенсори ідеально підходять для систем, де необхідно вимірювати навіть мікроскопічні зсуви або вібрації, зокрема в авіації чи військовій техніці. Інтенсивнісні сенсори є найпростішими у реалізації, оскільки вони реагують на зміну кількості світла, що доходить до детектора. Хоча їх точність нижча, вони ефективні для охоронних застосувань, наприклад, виявлення руху або замикання дверей.

Спектральні сенсори з використанням решіток Брега дозволяють точно вимірювати розтяг або температуру на великій кількості точок одночасно. Це дає змогу контролювати стан об'єктів із протяжною структурою: мостів, опор ліній електропередач, корпусів літаків або трубопроводів. У таких сенсорах довжина хвилі, яку відбиває решітка, зсувається пропорційно деформації або нагріванню волокна. Поляриметричні сенсори, хоч і вимагають використання спеціального волокна, забезпечують точний аналіз змін поляризації, що є цінним при виявленні крутильних навантажень або сейсмічних хвиль. Флуоресцентні та спектральні сенсори використовуються у високочутливих середовищах наприклад, у біологічному аналізі або моніторингу складу газів. Їхня чутливість до конкретних довжин хвиль світла дозволяє виявляти присутність навіть дуже малих концентрацій речовин [12].

Окремий клас розподілені сенсори, де все волокно діє як безперервний чутливий елемент. Такі сенсори базуються на аналізі зворотного розсіювання світла (Релеєвського, Раманівського, Бріллюенівського) і дозволяють відстежувати фізичні зміни на всій протяжності волокна що ідеально для великомасштабного моніторингу в геотехнічному та будівельному середовищі.

Гіроскопічні сенсори на основі волоконної оптики будуються за принципом ефекту Саньяка, де фазовий зсув між хвилями, що поширюються в протилежних напрямках по кільцевому волокну, прямо пропорційний кутовій швидкості. Такі сенсори широко застосовуються в авіаційних, морських і космічних системах навігації, де потрібна висока точність та відсутність рухомих частин.

Окреме місце займають спектральні сенсори, які працюють у вузьких діапазонах довжин хвиль і реагують на зміну поглинання або розсіювання світла внаслідок взаємодії з речовиною. Їхнє застосування охоплює біосенсори, флуоресцентні сенсори, сенсори для виявлення газів або рідин. Завдяки високій селективності та здатності до мініатюризації, такі сенсори використовуються в медицині, фармацевтиці, екологічному моніторингу.

Класифікація оптоволоконних сенсорів, побудована на основі фізичних принципів та функціонального призначення, відображає глибину і гнучкість цієї технології. Вона демонструє, що оптичне волокно є не лише транспортним середовищем для світла, а й універсальним чутливим елементом, здатним адаптуватися до широкого спектра задач від елементарного вимірювання температури до високоточних геонавігаційних або біохімічних аналізів. Такий підхід відкриває широкі перспективи для подальшої інтеграції сенсорів у критично важливі технологічні системи наступного покоління [13].

1.4 Огляд типів волоконних сенсорів. Стисла історія розвитку

Сучасна оптоволоконна сенсорика включає широкий спектр датчиків, що базуються на різних фізичних принципах. Незважаючи на спільну основу – оптичне волокно – кожен сенсор має специфіку конструкції. Температурні сенсори, особливо з решітками Бреґа, реагують на зміну довжини хвилі світла внаслідок температурного розширення волокна. Вони стабільні, точні й придатні для роботи в агресивних середовищах. Датчики тиску фіксують зміну геометрії волокна під навантаженням, впливаючи на фазу або інтенсивність сигналу. Реалізуються через інтерферометри або мікрорезонатори, використовуються в авіації, гідросистемах і технологічному контролі [14].

Спектральні сенсори аналізують зміни у спектрі світла, що проходить через волокно. Приклад – флуоресцентні сенсори, чутливі до газів, рідин або біомаркерів, що використовуються в медицині та екології. Гіроскопи на основі ефекту Саньяка фіксують фазовий зсув при обертанні волокна, забезпечуючи точне визначення кутової швидкості в навігаційних системах. Інтерферометричні сенсори (Мішельсона, Фабрі–Перо) здатні виявляти нано- та пікометричні зміни довжини шляху світла, що дозволяє контролювати вібрації, тиск, напруження. Інтенсивнісні сенсори найпростіші: фіксують

зміну рівня світла через вигин або перетиск волокна. Вони дешеві, компактні, але малочутливі (табл. 1.2) [15].

Таблиця 1.2 – Типи волоконних сенсорів та їх характеристики [2]

Тип сенсора	Принцип дії	Основна перевага	Основне застосування
Температурні (FBG, DTS)	Зміна довжини хвилі або інтенсивності світла	Висока точність, робота в агресивному середовищі	Моніторинг турбін, трансформаторів, будівель
Сенсори тиску	Деформація волокна чи модуляція фази	Чутливість до змін тиску, компактність	Гідравліка, авіація, промислові системи контролю
Спектральні / флуоресцентні	Зміна спектру світла через флуоресценцію або поглинання	Селективність до хімічного складу	Біосенсори, медична діагностика, екологічний моніторинг
Гіроскопічні (на ефекті Саньяка)	Фазовий зсув між двома пучками при обертанні	Висока точність орієнтації, без рухомих частин	Авіація, безпілотники, космічні апарати
Інтерферометричні (Фабрі-Перо, МЦ)	Інтерференція світлових пучків	Висока чутливість до деформацій і вібрацій	Сейсміка, акустика, виявлення тріщин
Інтенсивнісні	Зміна інтенсивності світла	Проста конструкція, низька вартість	Охоронні системи, базове виявлення руху
Розподілені (DTS, DAS, DVS)	Розсіювання світла по довжині волокна	Безперервне зондування на десятках кілометрів	Геомоніторинг, трубопроводи, охорона периметрів

Кожен тип сенсора відповідає на конкретну потребу в технологічному середовищі. Температурні сенсори є найпоширенішими, оскільки зміна температури прямо впливає на структуру волокна, і це легко виявити спектроскопічно. Завдяки цьому вони масово застосовуються як у важкій промисловості, так і в енергетиці. Сенсори тиску мають перевагу в компактності та точності, що дозволяє вбудовувати їх у гідравлічні системи, а також в середовища з високим тиском, наприклад у нафтогазовому бурінні. Спектральні та флуоресцентні сенсори мають вузькоспеціалізоване застосування вони дають змогу виявляти присутність конкретних речовин за рахунок змін спектральної структури сигналу. Це особливо важливо в медицині, де потрібна селективність до певних біомолекул.

Гіроскопічні сенсори, базовані на інтерферометрії, надзвичайно важливі для орієнтації в просторі, особливо там, де недоступна супутникова навігація. Їхня перевага — відсутність рухомих частин, що забезпечує стабільну роботу протягом довгих років. Інтерферометричні сенсори дають можливість виявляти навіть мікроскопічні механічні зміни. Вони потрібні в ситуаціях, де точність вимірювання має критичне значення наприклад, у конструкціях мостів, реакторів або літаків. Найпростішими залишаються інтенсивнісні сенсори, які використовуються для фіксації змін без вимог до абсолютної точності. Вони підходять для сигналізації чи охорони.

Розподілені сенсори є найпотужнішим інструментом просторового зондування. Вони здатні виявляти температурні або деформаційні зміни на протязі десятків кілометрів, що робить їх ідеальними для моніторингу інфраструктур великої протяжності.

Розподілені сенсори використовують усе волокно як чутливий елемент, фіксуючи зміни за рахунок зворотного розсіювання (Бріллюенівське, Релеєвське, Раманівське). Вони дозволяють вимірювати температуру або механічні напруження вздовж десятків кілометрів, що актуально для геомоніторингу, трубопроводів, охорони периметрів. Такі сенсори — це інтегровані рішення, які адаптуються до вимог середовища. Їх застосовують у найрізноманітніших сферах — від біомедицини до гірничої справи [16].

Оптичне волокно є основою усіх оптоволоконних сенсорів, виконуючи роль як хвилеводу, так і чутливого елементу. Його базова структура включає серцевину з вищим показником заломлення та оболонку з нижчим, що забезпечує повне внутрішнє відбиття. Це дозволяє світлу поширюватись з мінімальними втратами на великі відстані. У залежності від типу сенсора, волокно або ізолює сигнал від зовнішнього впливу, або навпаки — активно реагує на зміни в середовищі [17].

Зовнішні волоконно-оптичні датчики складаються з оптичних волокон, які підводяться до «чорної скриньки» та виводяться з неї, модулюючи

світловий промінь, що проходить через неї, у відповідь на вплив навколишнього середовища (рис. 1.2).

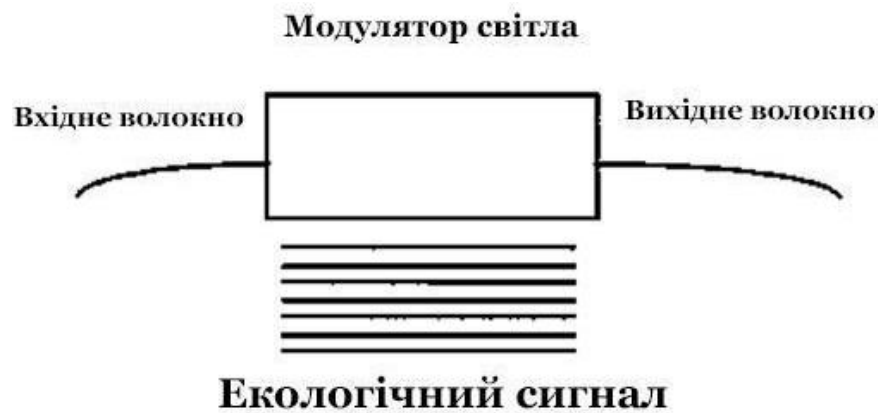


Рисунок 1.2 – Зовнішні волоконно-оптичні датчики

Внутрішні волоконно-оптичні датчики залежать від світлового променя (рис. 1.3), що поширюється через оптичне волокно, модулюючись впливом навколишнього середовища або безпосередньо, або через зміни довжини оптичного шляху в самому волокні, викликані навколишнім середовищем



Рисунок 1.3 – Внутрішні волоконно-оптичні датчики

Існує два основних типи оптичного волокна: одномодове (single-mode) та багатомодове (multimode). Одномодове волокно має дуже тонку серцевину (зазвичай ~ 9 мкм) і підтримує лише один мод світла це зменшує спотворення

сигналу та дозволяє здійснювати високоточні вимірювання. Багатомодове волокно, навпаки, має ширшу серцевину ($\sim 50\text{--}100\text{ мкм}$), по якій можуть одночасно проходити кілька мод, що зумовлює більшу розсіювання сигналу, але спрощує його зчитування.

Важливим є також параметр числова апертура (NA), який визначає кут, під яким світло може входити у волокно. Цей параметр особливо важливий для сенсорів на основі модуляції інтенсивності, як показано на рис. 3 книги: якщо відстань між двома волокнами змінюється, частина світла не захоплюється приймальним волокном, і це створює детектовану зміну інтенсивності сигналу. Такі рішення широко застосовуються в простих сенсорах вібрації, переміщення, положення тощо. Інша важлива характеристика ефекти, що виникають у середовищі навколо волокна, зокрема мікрогини (рис. 1.4), які налаштовані так, що вплив навколишнього середовища призводить до збільшення або зменшення втрат через перетворювач через втрати світла внаслідок невеликих вигинів волокна макрогини, а також еванесцентне поле хвильова енергія, яка виходить за межі серцевини у напрямі оболонки або зовнішнього середовища [18, 19].

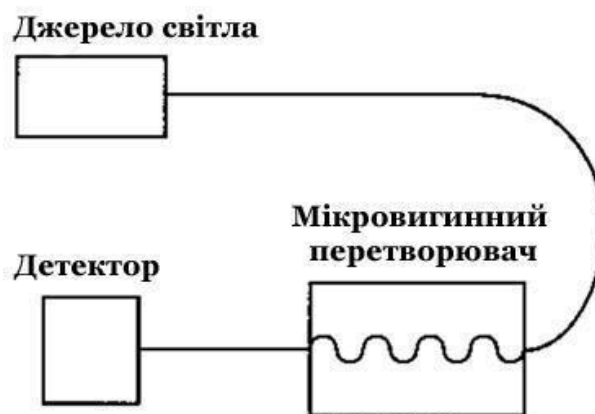


Рисунок 1.4 – Мікрівигнуті волоконні датчики

Цей ефект може бути використаний у сенсорах, де волокно безпосередньо контактує з рідинами чи газами. Наприклад, сенсори, засновані на зміні індексу заломлення середовища (рис. 1.5), або

флуоресцентні сенсори, де зовнішнє покриття волокна містить активну речовину (рис. 1.6), використовують саме взаємодію енергії хвилі з середовищем через еванесцентне поле.

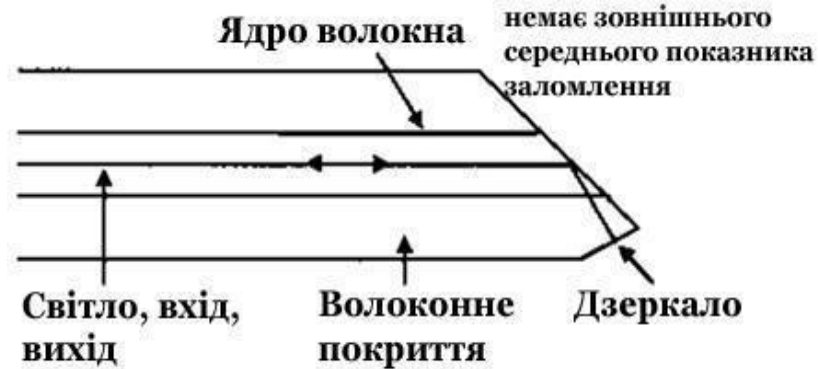


Рисунок 1.5 – Волоконний датчик, що використовує властивості критичного кута волокна для вимірювання тиску=показника заломлення шляхом вимірювання світла, відбитого назад у волокно

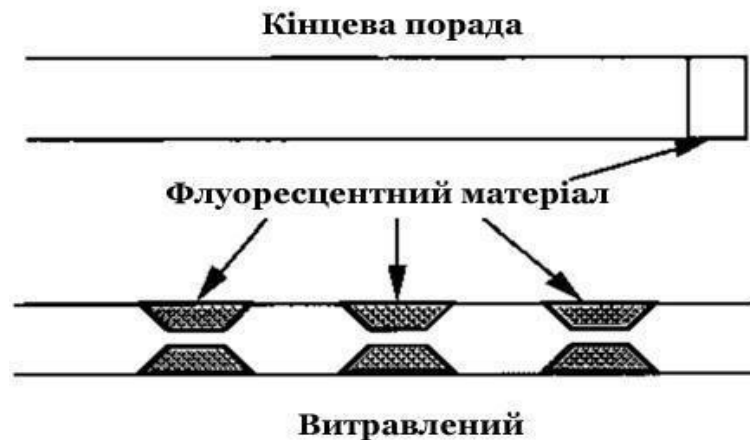


Рисунок 1.6 – Конфігурації флуоресцентних волоконно-оптичних сенсорних зондів

Ці конфігурації можуть бути використані для підтримки вимірювання фізичних параметрів, а також наявності або відсутності хімічних речовин. Ці зонди можуть бути налаштовані як односторонні або багатоточкові за

допомогою методів бокового травлення та приєднання флуоресцентного матеріалу до волокна

У підсумку, розуміння структури оптичного волокна та принципів поширення світла в ньому є базовим для проектування будь-якої сенсорної системи. Саме завдяки своїм фізико-оптичним властивостям волокно стало універсальним середовищем для побудови сенсорів нового покоління, що поєднують точність, надійність і мініатюрність.

1.4.1 Історичний огляд розвитку волоконної сенсорики

Ідея використання світла для вимірювання фізичних величин бере свій початок ще в 1960-х роках, із розвитком лазерних джерел і перших скляних хвилеводів. Уже в 1977 році були описані перші волоконні інтерферометричні сенсори, які працювали на ефекті фазового зсуву. Однак справжній прорив стався після відкриття фоточутливості кварцового скла та появи решіток Брега в 1978 році. Це дозволило створювати мініатюрні сенсорні елементи прямо в структурі волокна. Протягом 1980–1990-х років з'являються перші комерційні датчики температури, тиску та деформацій, а з 2000-х — і розподілені сенсорні системи. Сьогодні волоконна сенсорика активно використовується в енергетиці, будівництві, біомедицині, аерокосмічній галузі [19, 21].

1.4.2 Температурні сенсори на решітках Брега (FBG)

Принцип роботи заснований на зміні довжини хвилі λ_B , що відбивається FBG-структурою, у відповідь на зміну температури:

$$\lambda_B = 2n_{ef}L.$$

Зміна температури викликає зміни як у періоді решітки L , так і в ефективному показнику заломлення n_{ef} , що призводить до зсуву $\Delta\lambda_B$:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\alpha + \frac{1}{n_{\text{еф}}} \frac{dn_{\text{еф}}}{dT} \right) \Delta T.$$

FBG-сенсори дають змогу точно вимірювати температуру з роздільною здатністю до 0,1 °С, не потребують електроживлення у вимірювальній точці, і здатні до мультиплексування (рис. 1.7).

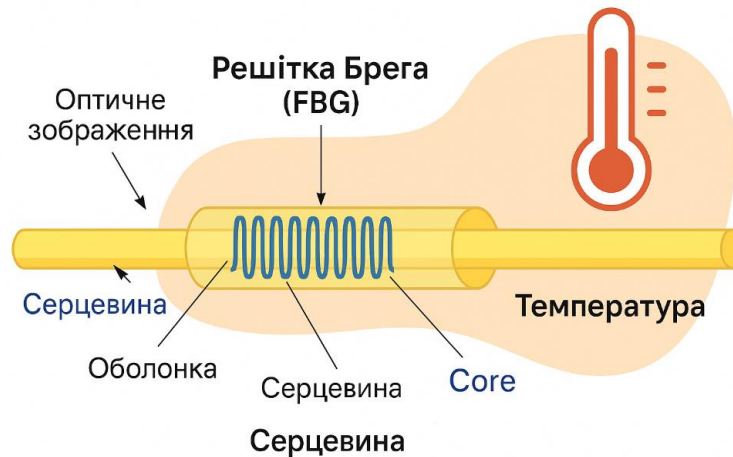


Рисунок 1.7 – Схема FBG-сенсора в температурному середовищі

1.4.2 Деформаційні сенсори (strain sensing)

FBG також реагує на механічну деформацію, що змінює L та $n_{\text{еф}}$. Чутливість до подовження ε визначається як:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon,$$

де $p_e \approx 0,22$ – ефективний п'єзооптичний коефіцієнт.

Ці сенсори використовуються для моніторингу напружень у конструкціях, мостах, вітрових турбінах та авіаційних деталях (рис. 1.8).

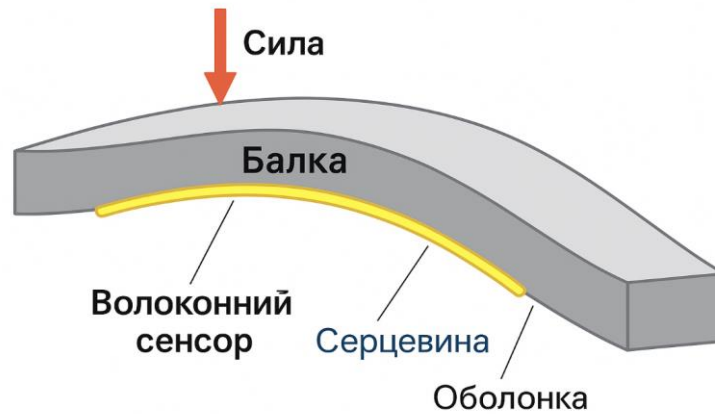


Рисунок 1.8 – Вигин балки з вмонтованим волоконним сенсором

1.4.3 Інтерферометричні сенсори (Маха–Цендера, Мішельсона)

Працюють на ефекті фазової модуляції (рис. 1.9). Світловий пучок розділяється на два: один зазнає зовнішнього впливу (наприклад, тиску), інший — ні. При з'єднанні пучків фіксується фазовий зсув:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot L,$$

де L – довжина чутливої ділянки; Δn – зміна показника заломлення.

Інтерферометричні сенсори надзвичайно чутливі, дозволяють вимірювати вібрації, тиск, звук, і застосовуються в гідроакустичних системах, сейсміці.

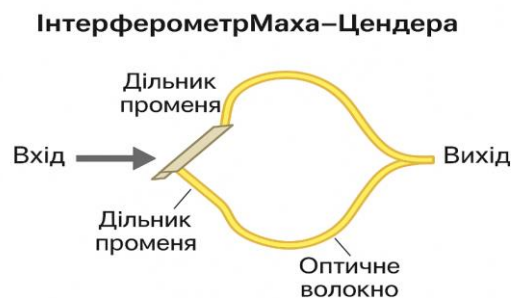


Рисунок 1.9 – нтерферометр Маха–Цендера з оптичним волокном

1.4.4 Розподілені сенсори (DTS, DAS, DVS)

Ці системи базуються на аналізі зворотного розсіювання світла — Рамановського, Бріллюенівського чи Релеєвського. Вся довжина волокна є чутливою зоною. Залежність розсіяння від температури або деформації дозволяє створити профіль змін уздовж волокна:

$$I(z, \lambda) \propto f(T(z), \varepsilon(z)),$$

де z – координата вздовж волокна;

$T(z)$ – температура,

$\varepsilon(z)$ – деформація.

Такі сенсори дозволяють зондувати в діапазоні від 10 км до 50 км одним кабелем (рис. 1.10). Застосування – трубопроводи, лінії електропередач, тунелі.

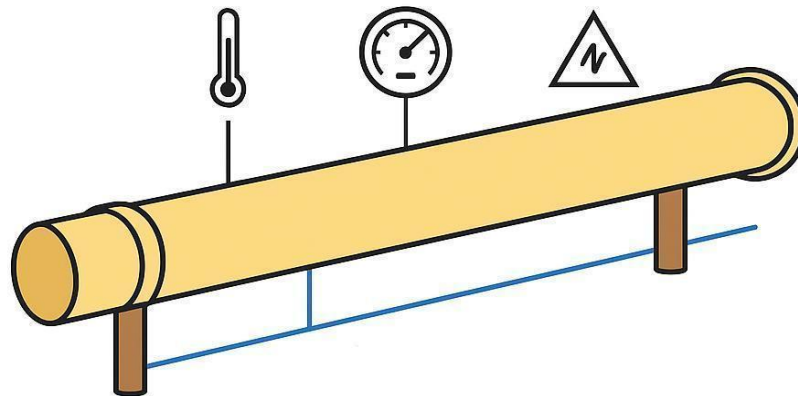


Рисунок 1.10 – Розподілений сенсор вздовж газопроводу

1.4.5 Інтенсивнісні сенсори

Прості сенсори, що реагують на зміну інтенсивності світла через згин волокна, обрив або поглинання (рис. 1.11):

$$I_{\text{вих}} = I_{\text{вх}} \cdot \eta(\text{зміни}).$$

Хоч і менш точні, мають низьку вартість і застосовуються в охоронних системах, сигналізації.

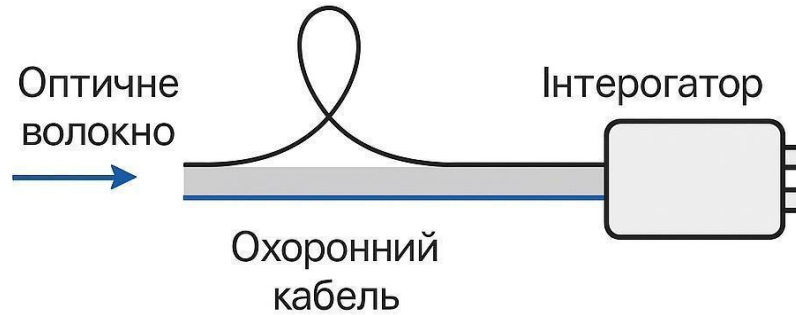


Рисунок 1.11 – Схема інтенсивнісного сенсора в охоронному кабелі

1.4.6 Гіроскопи на основі ефекту Саньяка

Світло проходить по колу в двох напрямках, і при обертанні системи між ними виникає фазовий зсув:

$$\Delta\phi = \frac{8\pi A\Omega}{\lambda c},$$

де A – площа кільця волокна;

Ω – кутова швидкість;

c – швидкість світла.

Ці сенсори використовуються в авіації, супутниках, дронах (рис. 1.12).

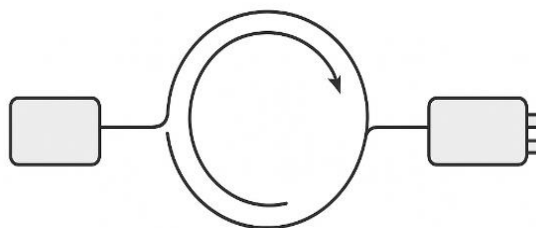


Рисунок 1.12 – Волоконний гіроскоп

2 БРЕГІВСЬКІ ВОЛОКОННІ ДАТЧИКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ І ТЕМПЕРАТУРИ

2.1 Принцип роботи та вплив механічних напружень

Волоконно-оптична Брегівська решітка (FBG – Fiber Bragg Grating) – це ділянка оптичного волокна з періодичною модуляцією показника заломлення у серцевині. Така мікроструктура працює як вузькосмуговий відбивач, який вибірково повертає світло з певною довжиною хвилі (так званою Брегівською довжиною хвилі), а інші довжини хвиль вільно проходять крізь волокно. Умовою максимального відбиття є резонанс Брегга – коли оптична довжина хвилі відповідає подвоєному періоду решітки, помноженому на ефективний показник заломлення світла у волокні. Це математично виражається формулою:

$$\lambda_B = 2n_{ef}L,$$

де n_{ef} – ефективний показник заломлення волокна;

L – період решітки.

Таким чином, FBG відбиває тільки хвилю з довжиною λ , що відповідає цій умові, а випромінювання інших довжин хвиль не затримується і продовжує розповсюджуватися далі вздовж волокна. На рис. 2.1 наведено схему структури волокна з решіткою Брегга та її спектральну характеристику відбиття: періодична зміна показника заломлення в серцевині (період λ) створює діелектричне дзеркало, яке відбиває вузьку спектральну лінію (пікову довжину хвилі λ) із вхідного широкого оптичного спектра

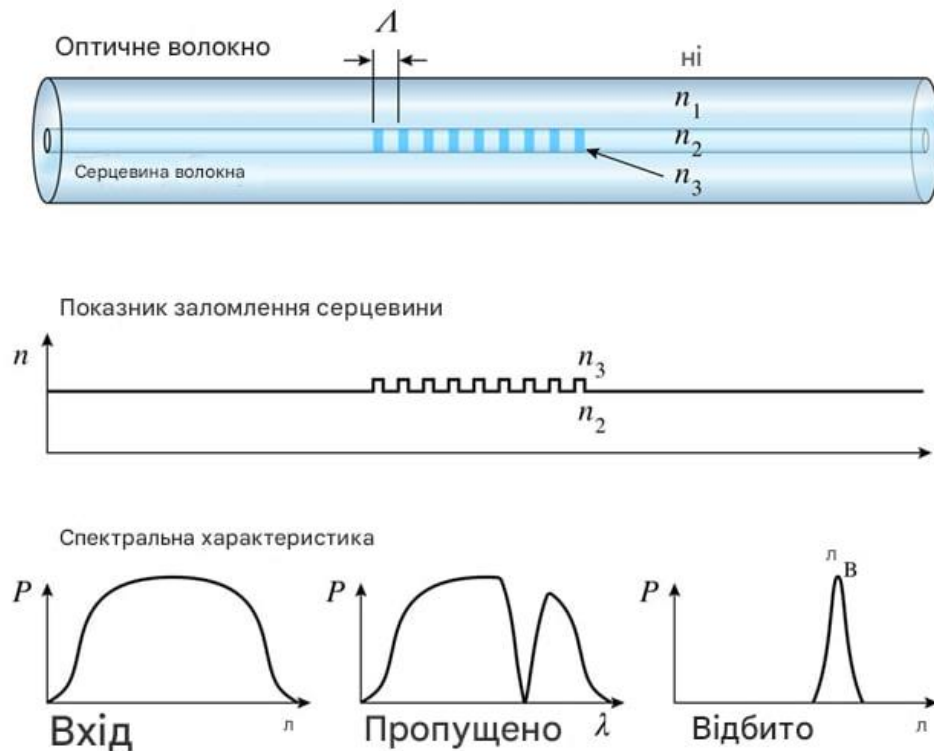


Рисунок 2.1 – Схематична будова волоконної решітки Брегга

Відбиту довжину хвилі Брегга Λ можна розглядати як центр вузького піка у спектрі (див. рис. 2.1, праворуч). Якщо волокно зі створеною в ньому решіткою перебуває у спокійному стані (без напружень), λ_B залишається фіксованою – визначається геометрією решітки та оптичними властивостями матеріалу. Коли ж до волокна прикладається механічне напруження (деформація розтягу або стиску), період решітки Λ змінюється, а разом з ним змінюється й ефективний показник заломлення n_{ef} за рахунок фотоеластичного ефекту в склі. Обидва ці фактори призводять до зсуву Брегівської довжини хвилі Λ . При розтягуванні волокна решітка подовжується (період Λ зростає) і показник заломлення дещо зменшується – результатом є зміщення відбитого піка в бік більших довжин хвиль (т.зв. «червоне» зміщення). Навпаки, при стисненні волокна Λ зміщується до коротших хвиль («синє» зміщення). Ця залежність є лінійною в межах пружних деформацій волокна і лежить в основі роботи FBG як сенсора

механичних напружень. Кількісно вплив деформації можна описати співвідношенням:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_{e\phi})\varepsilon,$$

де $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ – відносна деформація (розтяг)волокна;

$p_{e\phi}$ – характеризує ефективний фотоеластичний параметр матеріалу (для кварцового волокна $p_{e\phi} \approx 0,22$).

З формули видно, що при позитивній деформації (розтягуванні) $\Delta\lambda_B$ додатна, тобто пікова довжина хвилі збільшується. Для стандартного телекомунікаційного волокна з германій-легованою серцевиною величина $p_{e\phi} \approx 0,78$, тому можна очікувати близько \$0,78\$ мкм подовження хвилі на кожен відносний 1 % розтягування. Іншими словами, чутливість FBG до деформацій становить приблизно \$1,2\$ пм на \$1\$ мікрострейн ($\mu\varepsilon$) при довжині хвилі ~ 1550 нм. Це підтверджує лінійна характеристика: наприклад, розтяг на \$1000\$ $\mu\varepsilon$ викликає збільшення λ_B приблизно на \$1,2\$ нм. На рис. 2.2 наведено графік лінійного зростання довжини хвилі відбиття FBG із підвищенням механічної деформації волокна. Як видно, залежність майже пряма, що спрощує калібрування сенсора: достатньо визначити коефіцієнт пропорційності для даної решітки, щоб за виміряним спектральним зсувом однозначно обчислити величину напруження.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[a + \frac{1}{n_{e\phi}} \frac{dn_{e\phi}}{dT} \right] \Delta T.$$

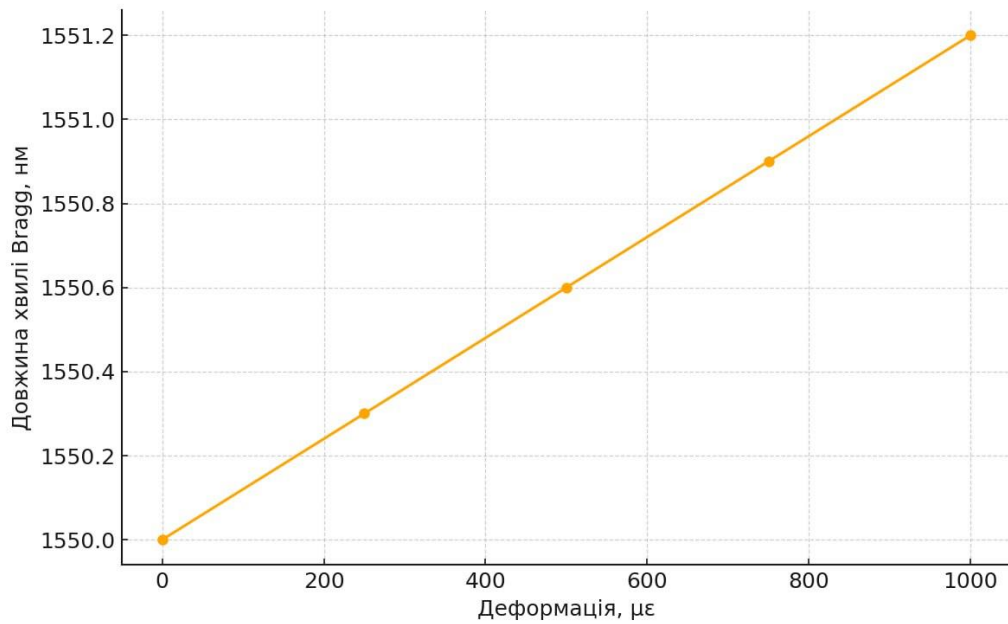


Рисунок 2.2 – Лінійна залежність зміщення відбитої довжини хвилі решітки Бреґґа від прикладеної механічної деформації волокна (розтягування). Кожні 100 $\mu\epsilon$ викликають приблизно 0,12 нм приросту λ_B , що відповідає чутливості $\sim 1,2$ пм/ $\mu\epsilon$

Завдяки описаному ефекту, FBG-датчик працює як прецизійний вимірювач деформації: відстежуючи зміну довжини хвилі відбитого піка $\Delta\lambda_B$, можна точно визначити величину механічного напруження або деформації об'єкта, до якого прикріплено сенсор. Важливо, що діапазон вимірювань обмежений пружними деформаціями самого оптичного волокна – зазвичай до $\sim 1\%$ ($\approx 10\,000\ \mu\epsilon$), оскільки при більших розтягах скловолокно починає втрачати міцність. У зазначених межах відгук FBG на напруження є лінійним і оборотним: після зняття навантаження решітка повертається до початкових параметрів, а λ_B – до вихідного значення.

2.2 Температурна чутливість і конструктивні особливості

Окрім деформацій, на спектр FBG суттєво впливає температура. Нагрівання чи охолодження волокна змінює параметри решітки двома шляхами:

1) через термічне розширення матеріалу (волокно подовжується або стискається, змінюючи період λ_B);

2) через температурну залежність показника заломлення – т.зв. термооптичний ефект (з підвищенням температури $n_{\text{еф}}$ для скла зазвичай зростає).

В результаті при збільшенні температури Брегівська довжина хвилі λ_B зміщується в бік більших значень, аналогічно до випадку механічного розтягу. Для більшості силікатних волокон цей зсув приблизно лінійний в помірному діапазоні температур і описується наближеною формулою:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[a + \frac{1}{n_{\text{еф}}} \frac{dn_{\text{еф}}}{dT} \right] \Delta T ,$$

де a – лінійний коефіцієнт термічного розширення волокна;

$\frac{1}{n_{\text{еф}}}$ – термооптичний коефіцієнт матеріалу.

Для кварцового волокна $a \approx 0,55 \times 10^{-6} K^{-1}$, а $\frac{1}{n_{\text{еф}}} \frac{dn}{dT} \approx 8,6 \times 10^{-6} K^{-1}$.

Сума цих внесків ($\sim 9,15 \times 10^{-6} K^{-1}$) визначає типову температурну чутливість FBG: близько 13–14 пм/°С для решітки з $\lambda_B \approx 1550$ нм. Іншими словами, підвищення температури на 1° викликає збільшення довжини хвилі відбиття приблизно на 0,01 %. На рис. 2.3 наведено умовні графіки нормалізованого коефіцієнта відбиття для двох температур: схематично проілюстровано зміщення спектру відбиття FBG при нагріванні: піковий відбиття, що при 20 °С знаходиться біля 1535,0 нм, при 40 °С зсувається до $\approx 1535,2$ нм.

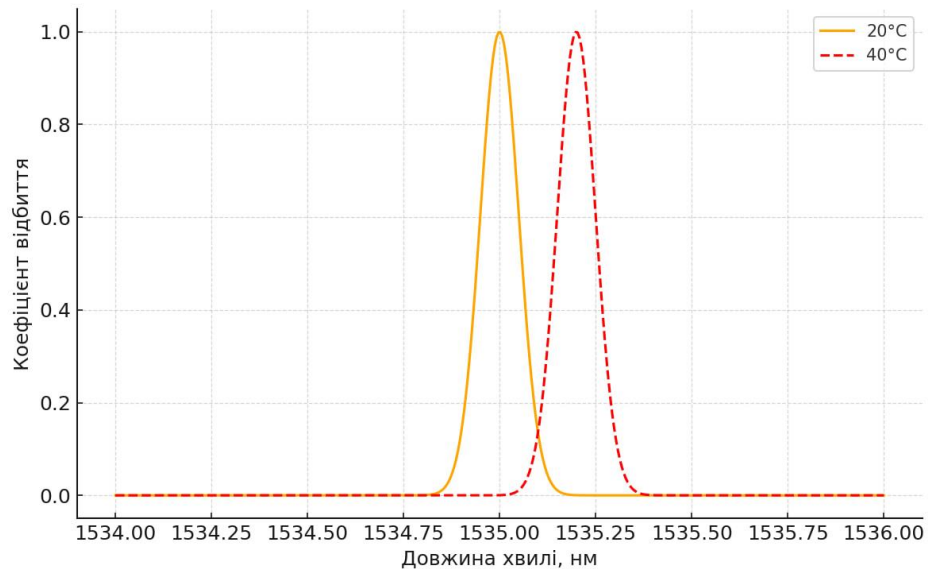


Рисунок 2.3 – Зсув спектрального піка відбиття решітки Брегга внаслідок підвищення температури: при 40 °C відбивна спектральна лінія зміщується на довшу хвилю порівняно з 20 °C

Температурна залежність формує побічну чутливість FBG-датчиків: сенсор, призначений для вимірювання деформації, одночасно реагує і на зміну температури середовища. Таким чином, зміна відбитої довжини хвилі $\Delta\lambda_B$ завжди є сумарним результатом двох факторів – механічного напруження та температури. Якщо необхідно вимірювати тільки один параметр, вплив другого слід врахувати або усунути. У практичних реалізаціях цього досягають декількома шляхами. По-перше, вибором конструкції сенсора: для вимірювання температури FBG зазвичай розміщують у так званій «вільній» конфігурації (не закріплюючи жорстко на об'єкті), щоб виключити появу механічних напружень у волокні. Такий FBG реагує лише на власну температуру. Натомість для вимірювання деформацій решітку міцно зв'язують з об'єктом (клеєм або вставляючи в конструкцію), щоб вона повністю відчувала механічні напруження, – але в цьому разі потрібно компенсувати побічний вплив температури. По-друге, застосовують компенсаційний датчик: поруч з робочою решіткою розміщують другу FBG, ізольовану від механічних навантажень, яка служить еталонним

температурним сенсором . Аналізуючи сигнал обох решіток, можна виключити температурну складову і визначити лише деформацію. Такий підхід (парні датчики «деформація+температура») є поширеним методом компенсації температурного впливу в волоконно-оптичних сенсорах. Відомо, що після монтажу системи повторна калібровка сенсорів часто неможлива, тож розділення температурних дрейфів від корисного сигналу є критично важливим для довготривалої точності вимірювань.

З конструктивної точки зору, FBG-датчики вирізняються компактністю та гнучкістю інтеграції. Довжина типової решітки – кілька міліметрів, а діаметр волокна $\sim 0,125$ мм, що дозволяє вбудовувати сенсори в матеріали або кріпити на поверхні без суттєвого впливу на об'єкт вимірювання. Ще однією особливістю є можливість мультиплексування: в одному волокні можна послідовно розмістити цілий ланцюжок FBG з різними резонансними довжинами хвиль. Кожна решітка відбиває свій піковий сигнал (наприклад, унікальний для даного сенсора канал), тому за допомогою єдиної лінії зв'язку можна одночасно зчитувати десятки точок вимірювання. Це суттєва перевага оптоволоконних систем у порівнянні з традиційними електричними давачами. Крім того, інформація закладена у зміні довжини хвилі, а не амплітуди, тому втрати в лінії або загасання волокна практично не впливають на точність показів – сигнал залишається достовірним навіть на великих відстанях передачі. Всі ці властивості роблять волоконні датчики на основі решіток Брегга надзвичайно привабливими для вимірювання механічних напружень і температури в різноманітних галузях – від моніторингу стану інженерних споруд до авіакосмічної техніки та енергетики.

3 РОЗРАХУНОК МОДЕЛЮВАННЯ БРЕГІВСЬКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

3.1 Теоретичний опис FBG-сенсора та основні формули

Волоконно-оптична Брегівська решітка (FBG) – це періодична структура в серцевині оптичного волокна, що утворюється шляхом модуляції показника заломлення за допомогою лазера. Така решітка вибірково відбиває світло певної довжини хвилі – так званої Брегівської довжини хвилі, решта спектру проходить далі (рис. 3.1). Довжина відбитої хвилі λ_B визначається умовою Брега:

$$\lambda_B = 2n_{ef}A,$$

де n_{ef} – ефективний показник заломлення волокна;

A – період решітки.

Таким чином, FBG відбиває світло лише з довжиною хвилі, що дорівнює подвоєному періоду решітки, помноженому на показник заломлення; інші довжини хвиль практично не відбиваються і продовжують розповсюдження волокном. На рис. 3.1 схематично показано принцип дії FBG: широкий спектр, що вводиться у волокно, на виході перетворюється на відбитий вузький пік при λ_B та спектр, що пройшов далі без цієї компоненти.

У непружному волокні (без деформацій) FBG відбиває фіксовану довжину хвилі (піковий пік на рис. 3.1). Якщо волокно деформувати (розтягнути або стиснути), період решітки A змінюється, як і ефективний показник n_{ef} , що призводить до зміщення Брегівської довжини хвилі. Іншими словами, механічна напруга (деформація) та температура впливають на λ_B : при розтягуванні решітки піковий відбитий спектр зміщується в бік більших довжин хвиль, а при стисканні – до менших (це проілюстровано на рис. 3.2).

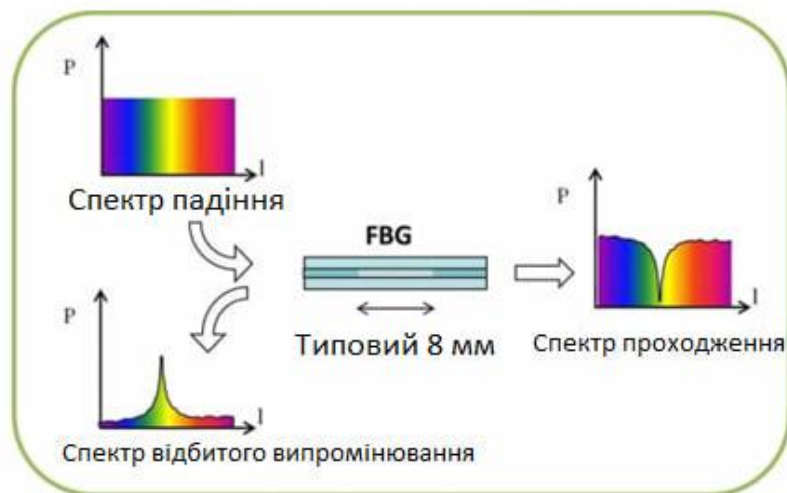


Рисунок 3.1 – Принцип роботи FBG-датчика (відбивання вибіркової довжини хвилі).

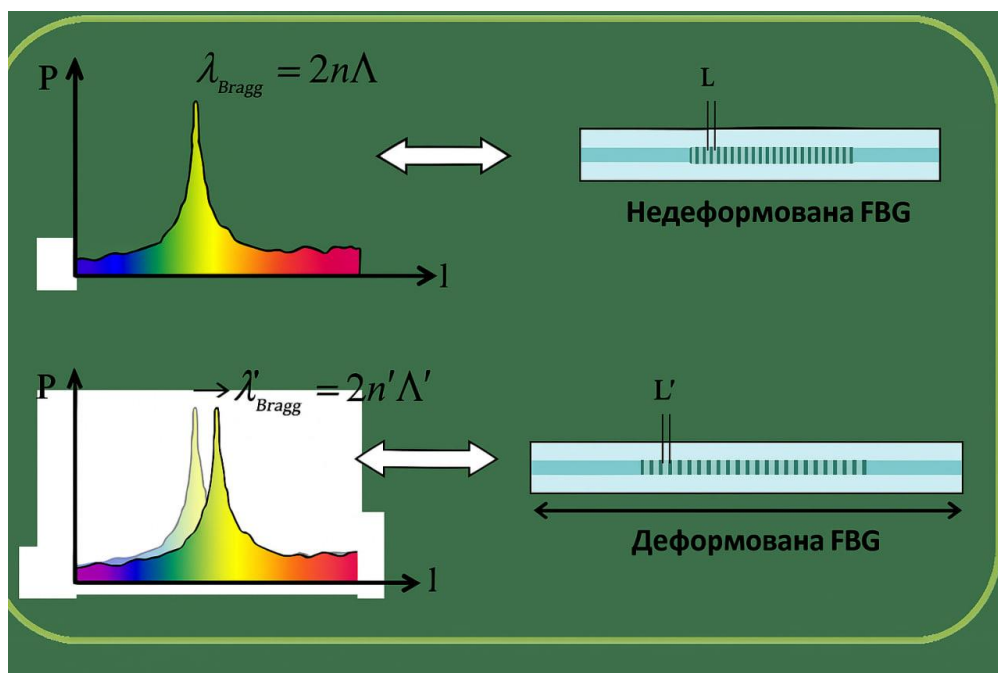


Рисунок 3.2 – Лінійне збільшення відбитої довжини хвилі FBG із зростанням деформації волокна

Ця залежність лежить в основі використання FBG як сенсора: відстежуючи зміну довжини хвилі відбиття ($\Delta\lambda$), можна точно визначати величину деформації або температуру середовища.

Основне рівняння, яке кількісно описує цей ефект, можна подати як суму двох складових – від деформації та від температури:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1 - P_e) \cdot \Delta\varepsilon + (a + \xi) \cdot \Delta T],$$

де $\Delta\varepsilon$ – відносна деформація волокна (розтяг, безрозмірна величина);

ΔT – зміна температури;

P_e – ефективний фотоеластичний коефіцієнт матеріалу волокна;

a – коефіцієнт термічного розширення волокна;

ξ – термооптичний коефіцієнт (характеризує зміну показника заломлення з температурою).

Перша частина формули відповідає впливу механічної деформації (через зміну періоду решітки та ефект фотоеластичності), а друга – впливу температури (через теплове розширення решітки та зміну показника заломлення). Таким чином, зміна довжини хвилі відбиття FBG пропорційна як прикладеній деформації, так і зміні температури волокна.

Для кварцового оптичного волокна з довжиною хвилі Брега ~ 1550 нм типові значення параметрів такі:

$$P_e \approx 0,22;$$

$$a \approx 0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\xi \approx 6,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Підставляючи їх, отримаємо порядкові чутливості сенсора: ≈ 14 пм/ $^\circ\text{C}$ для температури та $\approx 1,2$ пм/ $\mu\text{ε}$ для деформації. Це означає, що нагрів волокна на 1 $^\circ\text{C}$ зумовлює збільшення λ_B приблизно на 14 пм, а розтяг на 1 мікрострейн (10^{-6} відносної деформації) – на $\sim 1,2$ пм. Хоча абсолютне значення цих коефіцієнтів може дещо різнитися для різних решіток, співвідношення залишається лінійним у широкому діапазоні (поки деформації пружні). На рис. 3.2 наведено характерну лінійну залежність зміщення довжини хвилі від величини деформації: чим більша розтягуюча напруга, тим більше спектральний зсув λ_B .

FBG-сенсори вирізняються високою чутливістю та точністю вимірювань навіть мінімальних змін навколишнього середовища. Важливою їх перевагою є вимірювання в абсолютних величинах – вимірюється саме довжина хвилі, а не інтенсивність, тому результати не залежать від загального затухання сигналу або довжини лінії, і система не потребує частого калібрування. Окрім того, декілька решіток можна записати вздовж одного волокна на різних довжинах хвиль, створюючи мультиплексовану мережу датчиків – це дозволяє одним волокном вимірювати деформації в багатьох точках одночасно. Оптичні волоконні датчики нечутливі до електромагнітних завад, можуть працювати на великих відстанях від вимірювальної апаратури і легко вбудовуються в конструкції завдяки малим розмірам і вазі волокна. Саме тому FBG-технології набули широкого застосування в системах моніторингу стану інженерних споруд та матеріалів.

3.2 Приклади застосування, моделювання та температурна компенсація

FBG-датчики деформації активно впроваджуються для моніторингу стану будівельних конструкцій, зокрема залізобетонних елементів, мостів, тунелів тощо. Висока точність та довгострокова стабільність таких сенсорів робить їх незамінними для відстеження напружень і виявлення зародження тріщин у бетоні, де традиційні електричні тензодатчики не забезпечують потрібної надійності (наприклад, через корозію або дрейф). Вбудовуючи оптичні волокна з решітками Брега безпосередньо в конструкційні елементи, можна отримати систему «нерозривного» моніторингу, яка захищена від зовнішніх впливів і працює протягом всього життєвого циклу конструкції.

Практичний приклад – інтеграція FBG у залізобетонну балку для вимірювання її вигину та напружень під навантаженням. Сенсори зазвичай кріпляться до арматури або вставляються в спеціальні захисні гільзи, що закладаються у бетон при виготовленні елемента. На рис. 3.3 показано зразок бетонного елемента з оптичним датчиком деформації всередині: волокно з

решіткою розміщене між двома анкерами, жорстко закріпленими в бетоні, і сприймає подовження або стиснення разом із матеріалом конструкції. Подібні системи успішно використовуються для оцінки стану мостових балок, фундаментних плит, дамб – FBG-сенсори фіксують появу деформацій задовго до утворення видимих тріщин, що дає можливість завчасно взяти заходів.

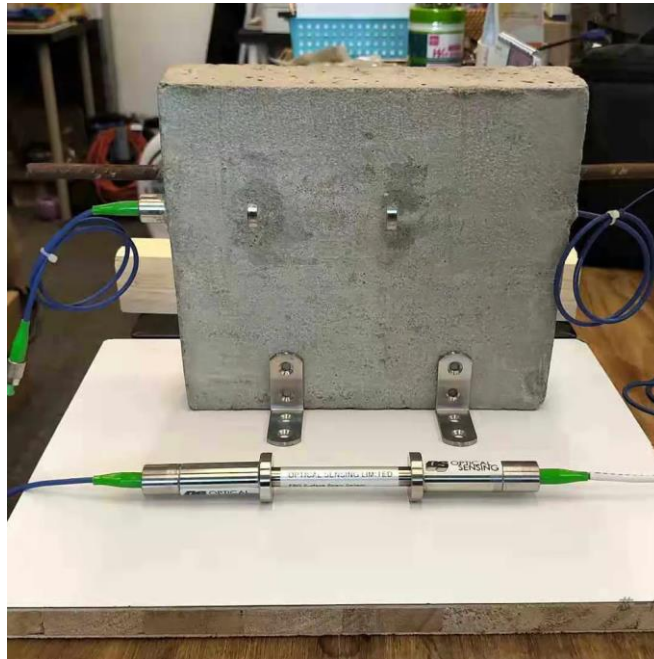


Рисунок 3.3 – Приклад інтеграції FBG-датчика в бетонну конструкцію (оптичний сенсор всередині залізобетонного зразка)

Моделювання поведінки Бреґівських сенсорів підтверджує їхню лінійність та високу роздільну здатність. Зокрема, чисельні та експериментальні дослідження показують, що зміщення спектрального піка FBG чітко відповідає прикладеному навантаженню. Наприклад, у роботі продемонстровано, що при одночасному збільшенні деформації на $2400 \mu\epsilon$ та температури на $80 \text{ }^\circ\text{C}$, два послідовно інтегровані FBG (один – на деформацію, інший – як еталон) дозволили визначити кожен вплив окремо з високою точністю. Моделі, що враховують механічні та температурні властивості волокна, застосовуються для оптимізації конструкції датчиків –

наприклад, вибору довжини решітки, кроку запису декількох решіток тощо, щоб підвищити чутливість чи роздільність сенсора. Розроблено також підходи з використанням спеціальних чірпованих (змінного періоду) решіток та багатомодових волокон, які дозволяють розтягнути діапазон вимірювань або одночасно вимірювати кілька параметрів (наприклад, вібрації, тиск) разом із деформацією.

Окреме завдання – компенсація впливу температури на покази FBG-деформаційних датчиків. Оскільки будь-яка зміна температури викликає зсув λ_B нарівні з механічною деформацією, необхідно відокремити ці ефекти для точного вимірювання. Найпростішим підходом є використання другого *опорного* сенсора, нечутливого до деформації. Практично це реалізується так: два FBG розташовуються близько один до одного (в одних умовах температури), але один з них міцно з'єднаний з конструкцією і сприймає і напругу, і температуру, а інший – ізольований від механічних напружень (наприклад, поміщений у трубку) і реагує тільки на температуру. В результаті отримуємо дві довжини хвиль відбиття: одна зміщується від обох факторів, друга – лише від температури. Віднімаючи ці сигнали або розв'язуючи систему рівнянь для двох решіток, можна точно обчислити вклад власне деформації (а також визначити температуру).

Схему такого підходу наведено на рис. 3.4: вимірювальна решітка механічно зв'язана з об'єктом і реєструє сумарний зсув $\Delta\lambda_1$, тоді як поруч із нею розташована еталонна решітка у розвантаженому стані, що дає лише температурний зсув $\Delta\lambda_2$. Подібна подвійна конфігурація FBG є ефективним рішенням проблеми термокомпенсації та широко застосовується на практиці.

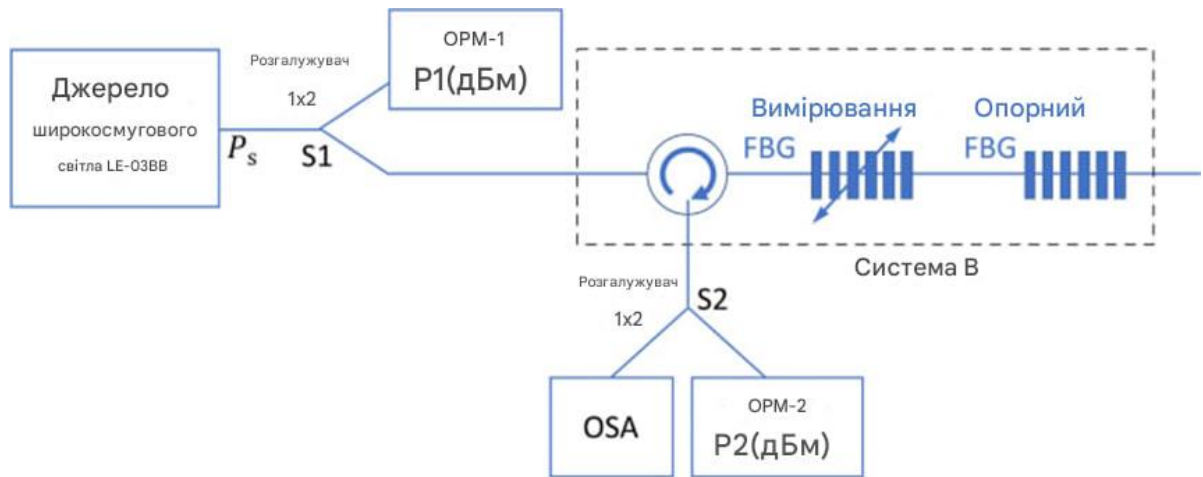


Рисунок 3.4 – Схема температурної компенсації з використанням двох FBG-решіток: вимірювальна (чутлива до деформації і температури) та опорна (чутлива лише до температури)

Таким чином, волоконні Брегівські датчики деформації дозволяють проводити високоточні вимірювання механічних напружень у різних середовищах. Вони успішно змодельовані теоретично та підтвержені експериментально, мають лінійну характеристику «зміна довжини хвилі – деформація» та піддаються калібруванню. Завдяки можливостям мультиплексування і вбудовування, FBG-сенсори знаходять застосування у системах структурного моніторингу цивільних споруд, в машинобудуванні, авіакосмічній техніці та інших галузях, де необхідно надійно вимірювати деформації. Комплексний підхід із використанням здвоєних решіток або додаткових заходів компенсації забезпечує усунення паразитного впливу температури, що дозволяє отримувати чистий сигнал механічної деформації навіть за умов значних температурних коливань. Це робить FBG-датчики надзвичайно привабливими для довготривалого моніторингу стану матеріалів і конструкцій у реальному часі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено теоретичне дослідження брегівських волоконних датчиків, призначених для вимірювання механічних напружень та температури, з урахуванням їх фізичних принципів, конструктивних особливостей та сфер застосування.

У першому розділі розглянуто класифікацію волоконно-оптичних сенсорів, їх принципи роботи, типи модуляції та конструктивні різновиди. Встановлено, що такі сенсори мають переваги, зокрема електромагнітну сумісність, високу чутливість та надійність у складних умовах.

У другому розділі досліджено принцип дії брегівських решіток як чутливих елементів. Показано, що зміна довжини хвилі відбиття під впливом температури чи деформації є основою для точного вимірювання фізичних параметрів.

У третьому розділі проаналізовано конструкції датчиків на основі решіток Брега та приклади їх використання в промисловості, енергетиці, транспорті. Відзначено переваги таких сенсорів — можливість мультиплексування, віддаленого моніторингу та стійкість до зовнішніх впливів.

Отже, поставлену мету роботи досягнуто: здійснено систематизований аналіз фізичних основ, конструкцій та практичного застосування брегівських волоконних сенсорів. Отримані результати можуть слугувати базою для подальших прикладних розробок у сфері моніторингу напружень і температури.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПСИЛАННЯ

1. Erdogan T. Fiber Bragg grating sensors: Recent developments and applications // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No 5. 1234.
2. Rao, Y. J. (2021). *Recent progress in distributed fiber-optic sensors*. *Optical Fiber Technology*, 60, 102395.
3. Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. 2020. 2nd ed. Artech House.
4. Ghosh S., Lee J. Advanced optical fiber sensors for structural health monitoring // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No 8. P. 9990–10001.
5. López-Higuera J. M. et al. (2022). Future trends in fiber-optic sensor systems. // *Journal of Lightwave Technology*. 2022. Vol. 40, No 12. P. 3456–3470.
6. Ye X., SuH., Han, J. Fiber optic sensing technology for smart civil engineering structures // *Sensors* 2023. Vol. 23, No 3. P. 2456.
7. Zubia J., Arrue J. Plastic optical fibers: An introduction to their technological aspects // *Optical Engineering*. 2020. Vol. 59, No 4. 040901.
8. Li, H., & Wang, Q. (2021). *Recent advances in FBG sensor multiplexing techniques*. *Applied Optics*, 60(16), 4567–4575.
9. Miao Y. et al. Review on distributed acoustic sensing (DAS) in geotechnical monitoring. *Measurement* 2023. 211 112527.
10. Kim H., Choi H. Fiber-optic gyroscopes: principles and recent developments // *Optical Review*. 2021. Vol. 28, No 1. P. 1–12.
11. Wang X., Zhang Y. Integrated photonic FBG sensors for harsh environments // *Photonics*. 2020. Vol. 7. No 3. P. 95.
12. Morales A., Fernández J. Application of FBG sensors in wind turbine blade monitoring // *Renewable Energy*. 2022. 190 P. 777–786.
13. Tang J., Lin B. (2022). FBG sensors in medical diagnostics: A review // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2022. Vol. 15. P. 345–359.
14. He Z., Bao X. *Recent advances in Brillouin distributed fiber sensors*. *Journal of Sensors*, 2023, 8845120.

15. Liao Y., Yin S. *Fiber Optic Sensors for Biomedical Applications* // Elsevier. 2021
16. Zhao J., Wang A. Multiparameter fiber-optic sensing system for real-time pipeline monitoring // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. 315, 112323.
17. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. 2020. 3rd ed. // Academic Press.
18. Roriz P., Frazão O., Marques C. Review of multi-parameter fiber-optic sensors // *Photonic Sensors*. 2021. No 11. P. 1–17.
19. Fernandes H. C., Santos J. L. Recent improvements in FBG-based force and pressure sensors // *Sensors*. 2022. Vol. 22, No 6. P. 2333.
20. Kuhtin S.M., Hnatenko O.S. Fibre-Optic Temperature Sensor Using Bragg Structure. Sumy State University, 2023 URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/93376> (дата звернення 17.06.2025)
21. Кухтін С.М. Оптоелектроніка. Частина 2. Харків: ХНУРЕ, 2016. 292 с.