

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)
ОПТОСЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПЕКИ ТА НАВІГАЦІЇ
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи МТЮЛС-21-1
Владислав СОЛОНЬКО
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна

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

Керівник проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ
(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-вимірвальна 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 Солоньку Владиславу Ярославовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптосенсорні технології безпеки та навігації

затверджена наказом університету від «23» травня 2025 р. № 408 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 23 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1 Фізичні принципи оптосенсорних технологій.

2. Типи оптосенсорних систем.

3. Конструктивні особливості систем безпеки та навігації з оптосенсорами.

4. Експлуатаційні характеристики оптосенсорних систем. 5. Формули та математичні моделі, що використовуються при аналізі та розрахунках.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1. Дослідити фізичні основи функціонування оптосенсорних систем. 2. Проаналізувати типи та конструкції оптоволоконних датчиків. 3. Дослідження та аналіз типів, конструкцій та експлуатаційних характеристик оптоволоконних датчиків. 4. Дослідити сучасні тенденції розвитку оптосенсорних технологій.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 11 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про оптосенсорні технології безпеки та навігації	07.05.25–13.05.25	Виконано
2	Дослідження фізичних основ функціонування оптосенсорних систем	14.05.25–22.05.25	Виконано
3	Дослідження та аналіз типів, конструкцій та експлуатаційних характеристик оптоволоконних датчиків	23.05.25–27.05.25	Виконано
4	Дослідження тенденцій розвитку оптосенсорних технологій	28.05.25–30.05.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	31.05.25–09.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	10.06.25–13.06.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	14.06.25–19.06.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.06.25–21.06.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	24.06.25–25.06.25	Виконано

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 48 с., 11 рис., 26 табл., 19 джерел, 1 додаток.

ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ, ОПТОВОЛОКОННІ СЕНСОРИ, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ, РЕШТКА БРЕГГА, СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ, СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ.

Об'єкт дослідження – волоконно-оптичні сенсорні технології для завдань безпеки та навігації.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження принципів функціонування, конструкцій та експлуатаційних характеристик оптоволоконних датчиків, а також аналіз сучасних напрямків їх застосування та розвитку у сфері безпеки і навігації.

Метод дослідження – теоретичний аналіз фізичних основ та прикладних рішень, що використовуються в оптосенсорних системах.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання:

1. Дослідити фізичні основи функціонування оптосенсорних систем.
2. Проаналізувати типи та конструкції оптоволоконних датчиків.
3. Дослідження та аналіз типів, конструкцій та експлуатаційних характеристик оптоволоконних датчиків.
4. Дослідити сучасні тенденції розвитку оптосенсорних технологій.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 48 pp., 11 figures, 26 tables, 19 sources, 1 appendix.

BRAGG GRATING, INTERFEROMETRY, FIBER OPTIC SENSORS, NAVIGATION SYSTEMS, REFRACTIVE INDEX, SECURITY SYSTEMS.

The object of research is fiber-optic sensor technologies for security and navigation tasks.

The purpose of the qualification work is to study the principles of operation, designs and operational characteristics of fiber-optic sensors, as well as analyze modern directions of their application and development in the field of security and navigation.

The research method is a theoretical analysis of the physical foundations and applied solutions used in optosensor systems.

To achieve the goal, the following tasks were set and solved in the work.

- 1.To investigate the physical foundations of the functioning of optosensor systems:
- 2.To analyze the types and designs of fiber optic sensors.
- 3.To study and analyze the types, designs and performance characteristics of fiber optic sensors.
- 4.To investigate current trends in the development of optosensor technologies.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Фізичні основи оптосенсорних технологій	9
1.1 Класифікація волоконно-оптичних датчиків	9
1.2 Принцип дії волоконно-оптичних сенсорів	11
1.3 Основи взаємодії світла з середовищем	12
1.4 Інтерферометрія як основа сенсорики	16
1.5 Характеристики джерел випромінювання та детекторів	19
1.6 Чинники, що впливають на точність і роздільну здатність	21
1.7 Математичні моделювання фізичних процесів.....	23
2. Типи оптоволоконних сенсорів та сфери їх застосування.....	30
2.1 Оптосенсорні технології в системах безпеки.....	30
2.2 Оптосенсорні технології в системах навігації	32
2.3 Приклади промислового, транспортного та медичного застосування	34
2.4 Інтеграція з цифровими технологіями	37
2.5 Мікромініатюризація, автономність та бездротові рішення	40
2.6 Перспективи впровадження в критичні сфери	43
Висновки	46
Перелік джерел посилання	47
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	49

ВСТУП

У сучасному світі, де зростають вимоги до точності, надійності та швидкості обробки інформації, особливу актуальність набувають оптосенсорні технології – це системи, що базуються на перетворенні вимірюваних фізичних величин у зміни оптичних характеристик волокна. Волоконно-оптичні сенсори (ВОС) займають провідне місце серед високочутливих вимірювальних систем завдяки їхній здатності працювати в екстремальних умовах, на великих відстаннях та з високою просторовою роздільною здатністю.

На відміну від традиційних електронних сенсорів, оптосенсори практично не зазнають електромагнітних завад, мають компактні розміри, низьке енергоспоживання та високу чутливість. Саме ці характеристики забезпечують їхнє широке застосування у критично важливих сферах – від структурного моніторингу будівель і мостів до біомедичних систем, а також у системах навігації та забезпечення безпеки повітряного, морського і залізничного транспорту.

Особливе місце серед оптосенсорів займають сенсори, побудовані на базі інтерферометрії, брегівських ґраток та сенсорів на основі змін показника заломлення. Вони дозволяють виявляти деформації, тиск, температуру, вібрації, переміщення та інші фізичні величини з мікронною точністю. Зокрема, для задач навігації важливими є сенсори прискорення, кутового обертання та положення, тоді як для безпекових систем – сенсори контролю структурної цілісності, пожежної безпеки, проникнення, тощо.

У зв'язку з цим вивчення фізичних основ, конструктивних особливостей, типів та напрямків застосування оптоволоконних сенсорів є актуальним напрямком сучасної науково-технічної діяльності.

Об'єкт дослідження – волоконно-оптичні сенсорні технології для завдань безпеки та навігації.

Мета роботи – дослідити фізичні принципи, конструкції, характеристики та напрями розвитку оптоволоконних сенсорів з точки зору їх застосування у безпекових і навігаційних системах.

Метод дослідження – аналіз теоретичних моделей, технічних характеристик, прикладних схем та наукових публікацій.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- дослідити фізичні основи роботи оптосенсорних систем;
- класифікувати типи волоконно-оптичних сенсорів;
- розглянути їх застосування у системах безпеки та навігації;
- проаналізувати технічні характеристики, чинники впливу та обмеження;
- окреслити сучасні тенденції розвитку галузі.

Таким чином, дана робота є актуальною у зв'язку із стрімким розвитком та широким розповсюдженням волоконно-оптичних сенсорів.

1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ОПТОСЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Класифікація волоконно – оптичних датчиків

Волоконно-оптичні датчики – це пристрої, що використовують оптичне волокно як канал передавання сигналу і як чутливий елемент. Їх основна перевага – електромагнітна нечутливість, компактність і висока точність.

За принципом дії вони бувають:

– інтенсивні (амплітудні) – вимірюють зміну інтенсивності світла внаслідок згасання, розсіяння або відбиття. Простий принцип, підходить для охоронних систем і детекторів положення;

– фазові – найчутливіші. Вимірюють зміщення фази світлової хвилі, зумовлене зміною довжини оптичного шляху. Базуються на інтерферометрії (Мах–Цендера, Майкельсона, Саньяка). Застосовуються в гіроскопах, датчиках тиску, прискорення;

– поляризаційні – засновані на зміні поляризаційного стану світла при зовнішньому впливі (навантаження, деформація, магнітне поле). Використовуються в структурному моніторингу;

– спектральні (FBG) – використовують волоконні Брэггівські решітки. Вимірювана величина змінює довжину хвилі відбитого сигналу. Найчастіше застосовуються для вимірювання температури та деформацій.

Основні принципи та типи волоконно-оптичних датчиків наведені на рисунку 1.1 [1].

За способом інтеграції сенсорного елемента оптичні сенсори поділяються на:

– внутрішні (intrinsic) – оптичне волокно виконує функцію сенсора. Зміни відбуваються безпосередньо в середині волокна (приклад – FBG або волоконно-оптичний гіроскоп);

– зовнішні (extrinsic) – світло передається через волокно до зовнішнього чутливого елемента (наприклад, мікродзеркального інтерферометра), після чого повертається назад.



Рисунок 1.1 – Огляд основних принципів і типів волоконно-оптичних датчиків

За типом модуляції світлового сигналу оптичні сенсори поділяються на:

- амплітудна – зміна інтенсивності (наприклад, через вигин волокна);
- фазова – зсув фази $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta L$, характер
- спектральна – зсув довжини хвилі ($FBG: \lambda_B = 2n\Lambda$);
- поляризаційна – зміна стану поляризації внаслідок деформацій;
- частотна на для інтерферометричних ВОД;
- використовується для акустичних або вібраційних сенсорів.

За протяжністю вимірювання оптичні сенсори поділяються на:

– точкові (point sensors) – забезпечують вимірювання в окремій точці (наприклад, одиночний FBG);

– розподілені (distributed sensors) – аналізують сигнал уздовж всієї довжини волокна, наприклад, методами OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry), Raman/Brillouin розсіяння. Застосовуються в периметральній безпеці, структурному моніторингу мостів, трубопроводів.

Застосування в навігації та безпеці:

– гіроскопи на основі інтерферометрії Саньяка – забезпечують надвисоку точність при вимірюванні кутових швидкостей, критично важливі в безGPS-навігації;

– периметральні охоронні сенсори – амплітудні ВОД, виявляють вібрації при спробах вторгнення;

- FBG-сенсори для моніторингу конструкцій – деформація змінює довжину хвилі відбиття, що дозволяє виявити напруження в критичних об'єктах (мости, сховища).

1.2 Принцип дії волоконно-оптичних сенсорів

Волоконно-оптичні сенсори використовують оптичне волокно як чутливий елемент, який реагує на зовнішні впливи (температура, тиск, деформація тощо) шляхом зміни параметрів світлового сигналу, що проходить через волокно. Ці зміни можуть відноситись до: інтенсивності, фази, поляризації або довжини хвилі світла. Структуру роботи оптоволоконного датчика можна представити у вигляді блок-схеми на рисунку 1.2 [2].

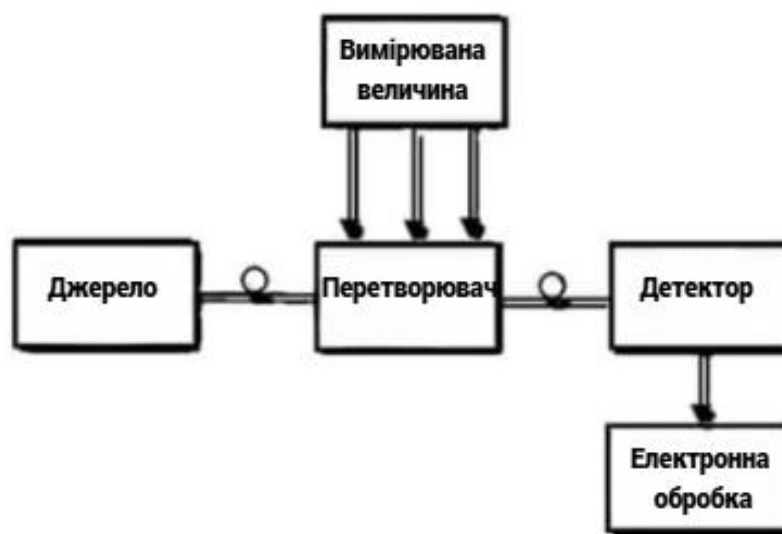


Рисунок 1.2 – Блок-схема оптоволоконного датчика

Схема роботи оптоволоконного датчика ВОС:

- джерело випромінювання генерує оптичне випромінювання, яке поширюється по оптичному волокну;

- перетворювач взаємодіє з вимірюваною фізичною величиною (наприклад, температурою, тиском, деформацією). В результаті цієї взаємодії

змінюються параметри світлового сигналу — інтенсивність, довжина хвилі, частота або фаза.

– змінений сигнал потрапляє до детектора, який перетворює оптичне випромінювання на електричний сигнал;

На завершальному етапі цей сигнал проходить електронну обробку, де аналізується зміна параметрів і визначається значення вимірюваної величини.

Типова структура волоконно-оптичного сенсора включає:

- джерело світла – лазер або світлодіод;
- оптичне волокно – передає світло до зони вимірювання;
- чутливий елемент – ділянка волокна або додатковий компонент, що взаємодіє з фізичним параметром;
- детектор – приймає змінений світловий сигнал;
- система обробки – аналізує сигнал та виводить результати.

1.3 Основи взаємодії світла з середовищем

Світло, як електромагнітне випромінювання, взаємодіє з матерією через кілька ключових механізмів. Ці процеси є фундаментальними для роботи оптосенсорів.

Поглинання (абсорбція): світлова хвиля, проходячи через речовину, втрачає інтенсивність через перетворення енергії в інші форми (тепло, збудження атомів).

Закон Бугера-Ламберта-Бера [3, 4]:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (1.1)$$

де $I(x)$ – інтенсивність світла після проходження шляху x ;

I_0 – початкова інтенсивність;

α – коефіцієнт поглинання, м^{-1} .

Приклад: оптосенсори, які працюють на основі поглинання, можуть виявляти концентрацію газів або біомолекул.

Відбиття: світло може відбиватись на межі двох середовищ. Частина світлового потоку повертається назад.

Коефіцієнт відбиття для нормального падіння [3, 5]:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, \quad (1.2)$$

де n_1 і n_2 – показники заломлення двох середовищ.

Застосування: відбиття використовується в сенсорах, які засновані на ефекті повного внутрішнього відбиття (наприклад, волоконно-оптичні сенсори).

Заломлення (рефракція): світло змінює напрям при переході між середовищами з різними показниками заломлення.

Закон Снелліуса [3, 4, 5]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (1.3)$$

де θ_1, θ_2 – кути падіння і заломлення.

Пристрій: багато лазерних і оптичних сенсорів використовують цей принцип для визначення меж середовищ.

Розсіяння: світло змінює напрямок під час взаємодії з частинками.

Розсіяння буває еластичним (Релея) та нееластичним (Рамана).

Закон Релея [6, 7]:

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}, \quad (1.4)$$

де λ – довжина хвилі світла.

Чим коротша хвиля, тим інтенсивніше розсіювання.

Приклад: оптосенсори, що працюють на ефекті розсіяння, використовуються для аналізу диму, пилу, біочастинок. Порівняльну характеристику основних оптичних ефектів, які використовуються в оптоволоконних сенсорах, наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1– Порівняння ефектів [3, 4, 6]

Явище	Фізичний опис	Формула	Використання в оптосенсорах
Поглинання	Перетворення енергії світла	$I = I_0 e^{-ax}$	Аналіз концентрацій
Відбиття	Зміна напрямку на межі	$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$	TIR-сенсори, волокна
Заломлення	Зміна шляху в іншому середовищі	$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$	Інтерферометри, лінзи
Розсіяння	Випромінення в різні боки	$I \propto 1/\lambda^4$	Сенсори диму, біосенсори

Структура та принципи роботи бреггівських ґраток (FBG): волокниста бреггівська решітка (FBG) утворює чутливий елемент.

FBG– це, по суті, мікроскопічні дзеркала з вибором довжини хвилі, тобто вони відображають одну певну довжину хвилі та передають решту оптичного сигналу, який генерує запитувач.

Один із способів подумати про це – біле світло. Біле світло складається з усього кольорового спектру, іншими словами, багатьох різних довжин хвиль. Якби біле світло було направлено по волокну, що містить FBG, можна було б побачити відбиття одного кольору, тоді як усе інше передається.

Щоб використовувати FBG разом із OFDR, решітки записуються безперервно по всьому волокну. Це означає, що відбиття повертається запитувачу з кожної точки вздовж волокна.

Закон Брега [8, 9]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1.5)$$

де λ_B – довжина хвилі Брега;

n_{eff} – ефективний показник заломлення;

Λ – період ґратки.

Зміна довжини хвилі під впливом температури та деформації [8, 9, 10]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T + \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon, \quad (1.6)$$

де α – коефіцієнт термічного розширення;

ζ – термооптичний коефіцієнт;

ΔT - зміна температури;

p_e – фотоеластичний коефіцієнт,

ε – механічна деформація.

Відбита довжина хвилі в кожному місці називається довжиною хвилі Брегга. Коли волокно (отже, решітка) розтягується, стискається або зазнає теплового розширення та стиснення, довжина хвилі Брегга, або відбита, змінюється.

Потім запитувач використовує техніку демодуляції, щоб спостерігати за зміною довжини хвилі та перетворювати її на вимірювання деформації та температури. Зв'язок між механічною деформацією та довжиною хвилі Брегга описано на малюнку нижче. Принцип роботи волоконних бреггівських решіток і залежність довжини хвилі Брегга від деформації та температури показано на рисунку 1.3 [11].

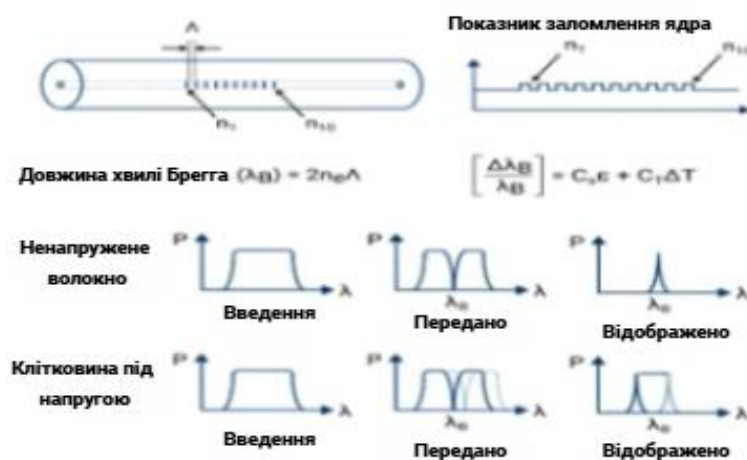


Рисунок 1.3 – Діаграма принципів роботи волоконних бреггівських решіток і зв'язку між довжиною хвилі Брегга, деформацією та температурою

Класифікацію волоконно-оптичних сенсорів наведено в таблиці 1.2 [4, 5, 8].

Таблиці 1.2 – Класифікація волоконно-оптичних сенсорів

Тип сенсора	Принцип роботи	Застосування
Інтенсивний	Зміна інтенсивності світла	Виявлення руху, тиску
Фазовий	Зміна фази світла	Вимірювання деформацій, вібрацій
Поляризаційний	Зміна поляризації	Вимірювання напруги, магнітного поля
Довжина хвилі	Зміна довжини хвилі (FBG)	Температура, деформація
Розсіювання	Використання ефектів Релея, Бріллюена	Розподілені вимірювання температури, деформації

1.4 Інтерферометрія як основа сенсорики

Інтерферометрія це метод вимірювання, що базується на аналізі інтерференційної картини, яка виникає внаслідок накладання когерентних світлових хвиль. Зміни фази між цими хвилями дозволяють з високою точністю виявляти переміщення, деформації, зміни показника заломлення або довжини оптичного шляху.

Принципова складова: Світло від когерентного джерела (наприклад, лазера) розділяється на два або більше променів, які проходять різні оптичні шляхи. Після відбиття/проходження через вимірювані об'єкти, промені знову поєднуються. Результуюча інтерференційна картина залежить від різниці фаз [8, 9, 12]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta L, \quad (1.7)$$

де $\Delta\phi$ – різниця фаз;

λ – довжина хвилі світла;

ΔL – зміна довжини оптичного шляху.

Цю зміну можна інтерпретувати як зсув інтерференційних смуг – і таким чином виміряти зміщення з нанометровою точністю.

Типи інтерферометрів, що застосовуються у волоконно-оптичних сенсорах, наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Типи інтерферометрів [8, 9]

Тип інтерферометра	Принцип дії	Використання в сенсоріці
Мікельсона	Розділення та відбиття променів	Виявлення вібрацій, переміщень
Фабрі-Перо	Багаторазове відбиття між дзеркалами	Газоаналіз, тиск, температура
Маха-Цендера	Розділення шляхів у двох плечах	Волоконно-оптичні сенсори
Саньяка	Використання дифракційних решіток	Компактні лазерні сенсори

Інтерферометричні сенсори у безпеці та навігації: системи безпеки:

– сейсмічні сенсори на базі інтерферометрів виявляють мікровібрації, які можуть бути ознаками руху або втручання (наприклад, у периметральній охороні);

– волоконно-оптичні сенсори використовують інтерферометри типу Маха-Цендера для детекції вторгнень у стратегічно важливі об'єкти.

Навігаційні системи:

– оптичні гіроскопи (інтерферометри Саньяка) визначають кутові швидкості без рухомих частин [7, 8, 9]:

$$\Delta\phi = \frac{8\pi A\Omega}{\lambda c}, \quad (1.8)$$

де A – площа контуру;

Ω – кутова швидкість;

c – швидкість світла.

Критичність інтерферометричних сенсорів: ці пристрої є дуже критичними для авіаційної, морської та космічної навігації.

Переваги інтерферометричних сенсорів:

– висока чутливість (до пікометрів і нановеличин);

– висока швидкість відгуку;

- мунітет до електромагнітних завад (у випадку волоконної реалізації);
- можливість інтеграції в розподілені системи моніторингу.

Обмеження:

- вимоги до стабільності температури;
- когерентність джерела світла;
- чутливість до вібрацій (що вимагає демпфування або компенсації).

Приклад: волоконно-оптичний інтерферометр Маха-Цендера.

Принципову схему інтегрального інтерферометра Маха-Цендера з фазовою модуляцією наведено на рисунку 1.4 [13].

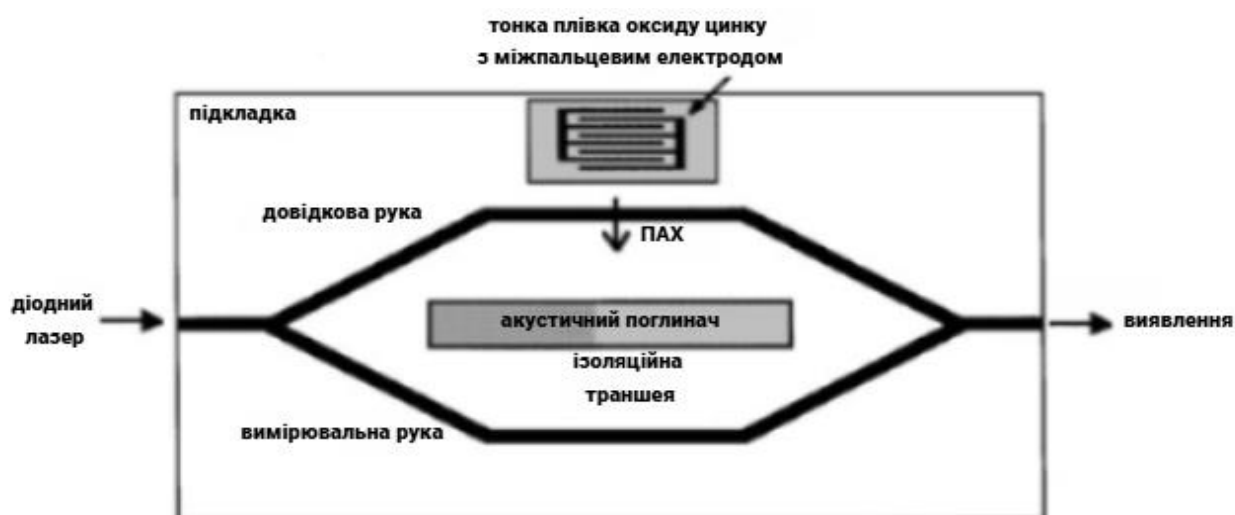


Рисунок 1.4—Принципова схема інтегрального інтерферометра Маха-Цендера з фазовою модуляцією

Схема роботи волоконно-оптичного інтерферометра (наприклад, Маха-Цендера):

- лазер → розділювач променя → два плеча (одне експоноване до зовнішнього впливу) → комбінатор → фотодетектор;
- при зміні температури, тиску чи деформації в одному плечі змінюється оптична довжина – виникає зсув фаз → сигнал.

1.5 Характеристики джерел випромінювання та детекторів

Джерела випромінювання: у оптосенсорних системах використовуються джерела випромінювання, які генерують оптичне випромінювання визначених характеристик – монохроматичність, когерентність, інтенсивність тощо.

Основні параметри оптичного джерела:

- довжина хвилі (λ) – визначає спектральну область вимірювання (ультрафіолетова, видима, ІЧ);
- оптична потужність (P) – визначає енергетичну здатність джерела;
- когерентність – ступінь узгодженості фаз хвиль у просторі та часі;
- монохроматичність – ширина спектра (FWHM);
- стабільність – зміна вихідних характеристик у часі;
- розмір джерела – впливає на просторову роздільну здатність.

Основні характеристики джерел випромінювання наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Джерела випромінювання [4, 5]

Джерело	Спектр	Потужність	Когерентність	Приклад використання
Лазери (LD, HeNe)	Вузкий	Висока	Висока	Інтерферометрія, гіроскопи
Світлодіоди (LED)	Широкий	Середня	Низька	Базові сенсори, освітлення
Суперлюмінесцентні діоди (SLD)	Середній	Висока	Середня	ОСТ, біосенсори
Теплові джерела	Широкий (ІЧ)	Слабка	Низька	Газоаналіз, термодетекція

Детектори випромінювання перетворюють світлове випромінювання на електричний сигнал. Вибір детектора залежить від спектрального діапазону, чутливості та швидкодії.

Ключові характеристики оптичного детектора:

- чутливість (S) – відношення вихідного сигналу до оптичної потужності;
- спектральна характеристика – залежність чутливості від довжини хвилі;
- час відгуку (τ) – час, за який детектор реагує на зміну освітлення;
- темновий струм – струм при відсутності світла;

– шум (NEP, D)* – мінімальний рівень сигналу, який детектор здатен розрізнити.

Основні характеристики поширених типів детекторів наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 Поширені типи детекторів [4, 5]

Тип детектора	Діапазон λ	Час відгуку	Переваги	Недоліки
Фотодіод (PD)	400–1100 нм	~нс	Простота, висока швидкодія	Обмежений спектр
APD (лавинний)	400–1000 нм	~нс	Підсилення сигналу, висока чутливість	Шум, висока напруга
PMT (фотопомножувач)	200–900 нм	пс-нс	Дуже висока чутливість	Великі габарити, чутливість до магнітних полів
Болометри	ІЧ (8–14 мкм)	~мс	Висока чутливість в ІЧ	Повільний відгук
ФПЗ (CCD/CMOS)	400–1000 нм	мс–мкс	Висока роздільна здатність, зображення	Обмеження швидкодії

Приклади поєднання джерел випромінювання з відповідними детекторами для сенсорики наведено в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Приклади поєднання для сенсорики [5, 8]

Призначення	Джерело	Детектор	Діапазон
Інтерферометричні сенсори	Лазер HeNe, LD	Фотодіод, APD	633–1550 нм
Біомедичні сенсори (ОСТ)	SLD	ФПЗ, фотодіоди	800–1300 нм
Газоаналіз у безпеці	ІЧ-лампа	Болометр	8–14 мкм
Сенсори навігації (гіроскопи)	Лазер (двофазний)	Фотодіод	1310–1550 нм

Формула детекції [4, 5, 14]: фотострум:

$$I_{ph} = R \cdot P, \quad (1.9)$$

де I_{ph} – фотострум (А);

R – фоточутливість (А/Вт);

P – потужність падаючого світла.

1.6 Чинники, що впливають на точність і роздільну здатність

Основні чинники, що впливають на точність вимірювань, наведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Основні чинники, що впливають на точність [4, 8]

Чинник	Вплив на точність
Шум	Визначає мінімальний детектований сигнал
Нестабільність джерела	Призводить до коливань сигналу
Температурні коливання	Зміна оптичних параметрів (наприклад, $n(T)$)
Механічні вібрації	Впливають на вирівнювання оптичних елементів
Електронні спотворення	Напруга, шум у фотодетекторах
Довжина хвилі світла	Менші λ дають вищу фазову чутливість
Калібрування системи	Невірна шкала спотворює результат

Основні чинники, що впливають на роздільну здатність

Формула (для інтерферометричних сенсорів) [8, 11]:

$$\delta L = \frac{\lambda}{2 \cdot SNR}, \quad (1.10)$$

де δL – роздільна здатність вимірювання довжини;

λ – довжина хвилі;

SNR – відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio).

Приклад: для лазера $\lambda = 1550$ нм і $SNR = 100$, ми отримаємо:

$$\delta L = \frac{1550}{2 \cdot 100} = 0,775 \text{ нм}$$

Вплив довжини хвилі на роздільну здатність наведено в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Вплив довжини хвилі [11]

Довжина хвилі, нм	Роздільна здатність (для однакового SNR)	Типовий діапазон
850	Вища	LED, коротке NIR
1310	Середня	SLD, волоконна сенсорика
1550	Нижча	Лазери, гіроскопи

Чим коротша хвиля – тим вища фазова роздільність, але і чутливість до розсіяння зростає.

Температурні впливи: температурні коливання змінюють: показник заломлення (n), довжину оптичного шляху (L), власні параметри детекторів (темновий струм, шум).

Зміна оптичного шляху [4, 12]:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (1.11)$$

де α – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

ΔT – зміна температури.

Основні типи шумів та їх вплив на роботу електроніки наведено в таблиці 1.9 [7, 15].

Таблиця 1.9 – Шум і електроніка [4, 14]

Тип шуму	Джерело	Вплив
Термошум (Джонсона)	Резистори, підсилювачі	Знижує SNR
Темновий струм	Фотодіоди, CCD	Додає фоновий сигнал
Шум дроблення	Квантова природа світла	Обмеження точності
Механічний шум	Вібрації, резонанс корпусу	Спотворення фаз

Когерентність джерела [4, 8]:

Когерентна довжина L_{coh}

$$L_{coh} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (1.12)$$

де $\Delta\lambda$ – спектральна ширина.

Висока когерентність потрібна для інтерферометрії, але надмірна когерентність може створювати шум багатопроменевої інтерференції в волоконних системах.

Стабільність оптичних компонентів:

- оптичні волокна піддаються мікрозгинанню і температурному впливу;
- дзеркала та розділювачі повинні мати високий коефіцієнт відбиття/передачі, стабільність в часі й при вібраціях.

Приклад для навігаційної системи: волоконно-оптичний гіроскоп (FOG):

- точність залежить від стабільності довжини хвилі лазера, температурної стабільності волокна та електроніки;
- при $\Omega = 10^{-4} rad/s$, потрібна роздільна здатність детектора менше 1 нрад, що досягається інтеграцією сигналу та фазовою модуляцією.

Узагальнення основних чинників впливу та способів їх компенсації наведено в таблиці 1.10.

Таблиця 1.10 – Узагальнююча таблиця впливу [7, 8, 12]

Чинник	Впливає на	Механізм впливу	Як компенсувати
Температура	Точність	Зміна n, L	Термоізоляція, калібрування
Довжина хвилі	Обидва	Залежність фазового зсуву	Вибір джерела
Когерентність	Обидва	Можливість інтерференції	Підбір джерела, довжини
Шум фотодетектора	Роздільність	Зниження SNR	Охолодження, фільтрація
Вібрації	Точність	Спотворення оптичного шляху	Амортизація, демпфери
Механічна нестабільність	Обидва	Рух дзеркал, лінз	Жорстке кріплення, компенсація

1.7 Математичні моделювання фізичних процесів

У даному підрозділі проведено математичне моделювання фізичних явищ, що лежать в основі роботи волоконно-оптичних сенсорів, зокрема брегівських решіток (FBG) та інтерферометричних систем. На основі теоретичних формул, наведених у розділі 1, було реалізовано обчислювальне моделювання ключових залежностей, що описують зміну довжини хвилі від впливу температури та деформації, фазові зсуви в інтерферометрі та зміну інтенсивності інтерференційного сигналу.

З метою наближення результатів до реальних умов, у моделі враховано експериментальні похибки шляхом додавання статистичних збурень до розрахованих даних. Це дозволило побудувати графіки, які одночасно відображають теоретичну поведінку системи та її можливу реакцію при практичному застосуванні.

Нижче наведено основні математичні залежності, що описують ці процеси, а також побудовані за ними графіки з поясненнями, що демонструють вплив кожного з ефектів на роботу оптосенсорних технологій у контексті систем безпеки та навігації.

Вихідні дані до 1-го графіку, який відображає «температурну залежність довжини хвилі Брега», на основі формули (1.6) [8, 9, 12]:

– температурна залежність довжини хвилі Брега дорівнює:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\varepsilon]. \quad (1.6)$$

У нашому випадку розглядається лише температурну складову, тобто $\varepsilon = 0$, тому формула набуває такий вигляд:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (\alpha + \xi)\Delta T.$$

Вихідні дані до формули (1.6) та моделювання 1-го графіку наведено в таблиці 1.11. Графік температурної залежності довжини хвилі Брега показаний на рисунку 1.5.

Таблиця 1.11 – Вихідні дані до формули (1.6) та моделювання 1-го графіку

Позначення	Значення	Одиниці виміру	Пояснення
λ_B	1550	нм	Початкова довжина хвилі Брега
α	$1,0 \times 10^{-6}$	$1/^\circ C$	Коефіцієнт теплового розширення волокна
ξ	$8,6 \times 10^{-6}$	$1/^\circ C$	Термооптичний коефіцієнт
ΔT	від 0 до 100	$^\circ C$	Зміна температури
p_e	0,22	–	Фотоеластичний коефіцієнт (не використовується)
шум	± 0.05	нм	Імітація експериментальної похибки

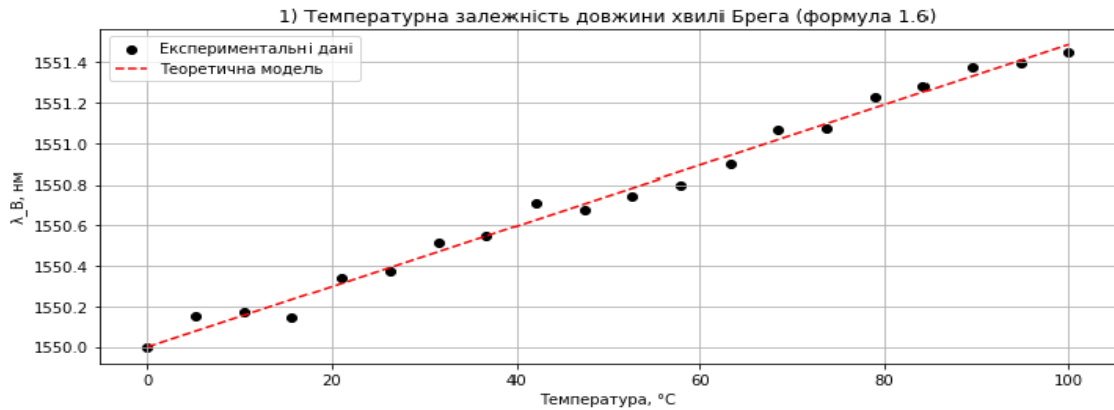


Рисунок 1.5 – Графік температурної залежності довжини хвилі Брега за формулою (1.6)

На графіку зображено залежність зміни довжини хвилі Брега $\Delta\lambda_B$ від зміни температури ΔT у діапазоні від 0 °C до 100°C.

Пояснення до графіка:

- чорні точки – експериментальні дані з урахуванням шуму (імітація реальних вимірювань FBG – сенсора);
- червона пунктирна лінія – теоретична крива, що описує ідеальну залежність згідно з формули (1.6).

Аналіз результатів першого графіка:

- експериментальні точки підтверджують лінійний характер залежності довжини хвилі від температури;
- при зростанні температури на 100 °C, довжина хвилі Брега збільшується приблизно на 1,4 нм;
- похибка моделювання не перевищує ± 0.05 нм, що відповідає типовим характеристикам FBG-сенсорів у реальних умовах.

Вихідні дані до 2-го графіку, який відображає «деформаційну залежність довжини хвилі Брега», на основі формули (1.7) (табл. 1.12):

- деформаційна залежність довжини хвилі Брега [8, 9, 12]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - p_e)\varepsilon]. \quad (1.7)$$

У нашому випадку ми аналізуємо вплив лише деформації, тобто $\Delta T = 0$, і формула набуває вигляду:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (1 - p_e)\varepsilon.$$

Таблиця 1.12 – Вихідні дані до формули (1.6) та моделювання 2-го графіку

Позначення	Значення	Одиниці виміру	Пояснення
λ_B	1550	нм	Початкова довжина хвилі Брега
p_e	0,22	–	Фотоеластичний коефіцієнт
ε	від 0 до 1000	μє (мікрострейн)	Деформація волокна
$\Delta\lambda_B$	Обчислення за формулою	нм	Зсув довжини хвилі Брега
шум	±0,05	нм	Імітація похибки вимірювань

На графіку (рис. 1.6) зображено залежність зміни довжини хвилі Брега $\Delta\lambda_B$ від прикладеної механічної деформації ε .

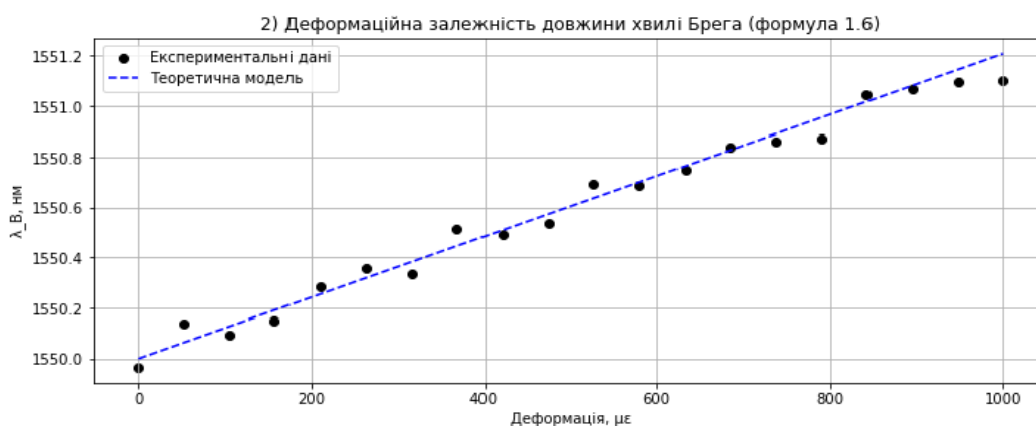


Рисунок 1.6 – Графік деформаційної залежності довжини хвилі Брега за формулою (1.7)

Пояснення до графіка:

- чорні точки – відображають експериментальні значення, отримані шляхом додавання шуму до обчислених теоретичних результатів;
- синя пунктирна лінія – відображає теоретичну лінійну модель без похибок.

Аналіз результатів другого графіка:

- експериментальні точки підтвердили лінійну залежність між довжиною хвилі Брегга і деформацією;
- зі зростанням деформації до 1000 $\mu\epsilon$, довжина хвилі Брега зміщується приблизно на 1,2 нм, що узгоджується з теоретичними розрахунками;
- похибка не перевищує $\pm 0,05$ нм, що демонструє стабільність і високу чутливість FBG-сенсора до деформації.

Вихідні дані до 3-го графіку, який відображає «залежність фазового зсуву від зміни довжини оптичного шляху», на основі формули (1.8) (табл. 1.13):

- залежність фазового зсуву від зміни довжини оптичного шляху (фазовий зсув у волоконно-оптичному інтерферометрі) [11, 12, 16] (рис. 1.7):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta L}{\lambda}. \quad (1.8)$$

Таблиця 1.13 – Вихідні дані до формули (1.7) та моделювання 3-го графіку

Позначення	Значення	Одиниці виміру	Пояснення
ΔL	від 0 до 2	мкм	Зміна довжини одного з плечей інтерферометра
λ	1550	нм (або $1,55 \times 10^{-6}$ нм)	Довжина хвилі випромінювання в оптичному волокні
$\Delta\varphi$	Обчислюється за формулою	рад	Зміна фази світлового сигналу через зміну шляху
шум	$\pm 0,1$	рад	Імітація експериментальної формули (вібрації, шум у волокні)

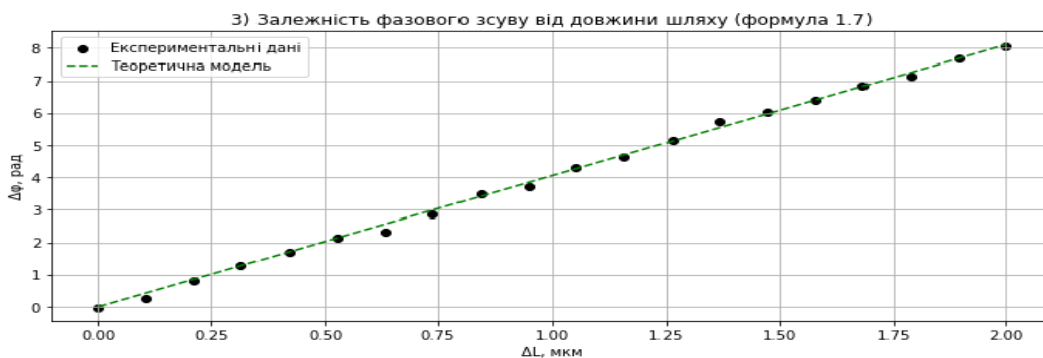


Рисунок 1.7 – Графік залежності фазового зсуву від довжини шляху за формулою (1.8)

Графік демонструє, як фазовий зсув $\Delta\phi$ змінюється зі збільшенням довжини шляху ΔL в оптичному інтерферометрі типу Маха – Цендера.

Пояснення до графіка:

- чорні точки – експериментальні значення фазового зсуву з урахуванням флуктуацій (шуму);

- зелена пунктирна лінія – ідеальна теоретична залежність згідно формули (1.7).

Аналіз результатів третього графіка:

- при зміні довжини шляху на 2 мкм фазовий зсув досягає близько 8 рад;

- похибка вимірювань, змодельована шумом $\pm 0,1$ рад, не спотворює загальну лінійну картину, що підтверджує стійкість інтерферометричної системи до дрібних збурень.

Вихідні дані до 4-го графіку, який відображає «залежність інтенсивності інтерференції від фазового зсуву», на основі формули (1.9) (табл.1.14):

- залежність інтенсивності інтерференції від фазового зсуву (зміну нормалізованої інтенсивності інтерференційного сигналу залежно від фазового зсуву) (рис. 1.8) [8, 16]:

$$I = \frac{1 + \cos(\Delta\phi)}{2}. \quad (1.9)$$

Таблиця 1.14 – Вихідні дані до формули (1.7.1) та моделювання 4-го графіку

Позначення	Значення	Одиниці виміру	Пояснення
$\Delta\varphi$	від 0 до 4π	радіан	Змінюваний фазовий зсув у системі інтерференції
I	обчислюється за формулою	безрозмірна	Нормалізована інтенсивність інтерференційного сигналу (0 до 1)
шум	± 0.02	–	Доданий шум для імітації реального фотодетекторного сигналу

На графіку показано зміну інтенсивності I в залежності від фазового зсуву $\Delta\varphi$.

Пояснення до графіка:

- чорні точки – експериментальні вимірювання інтенсивності з урахуванням шумів;
- магентова пунктирна лінія – теоретична крива, що відображає ідеальну косинусоїдальну залежність.

Аналіз результатів четвертого графіка:

- графік демонструє періодичну зміну інтенсивності від 0 до 1 у відповідь на фазовий зсув;
- експериментальні точки підтверджують відповідність теоретичній залежності.

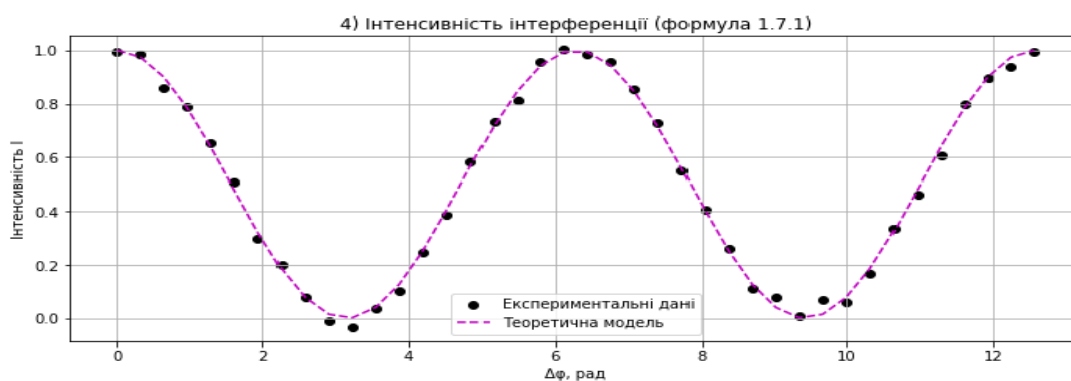


Рисунок 1.8 – Графік інтенсивності інтерференції по формулі (1.9)

2 ТИПИ ОТПОВОЛОКОННИХ СЕНСОРІВ ТА СФЕРИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

2.1 Оптосенсорні технології в системах безпеки

Оптосенсорні системи безпеки використовують властивості світлових хвиль для виявлення змін у навколишньому середовищі. Вони особливо ефективні в складних умовах, де традиційні електронні сенсори не працюють – наприклад, в умовах сильних електромагнітних завад або на великих відстанях.

Принципи дії оптосенсорних систем безпеки: основні типи фізичних впливів, які виявляються оптичними сенсорами:

- вібрації (спроби проникнення через огорожу);
- зміна температури (теплова атака, займання);
- механічні деформації (згинання, натяг волокна);;
- акустичний тиск (удари, буріння);

У багатьох випадках ці зміни впливають на такі оптичні параметри, як інтенсивність, фаза або довжина хвилі світлового сигналу, що передається по волокну.

Основні типи оптосенсорних систем безпеки: класифікацію систем за принципом дії наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація систем за принципом дії [5, 6, 10]

Тип системи	Принцип роботи	Галузі застосування
Волоконно-оптичні периметральні	Детекція вібрацій на огорожі	Захист об'єктів, кордонів, баз
Лазерні (інфрачервоні) бар'єри	Перетинання променя	Входи, вікна, тунелі
Розподілені DAS-системи	Аналіз зворотного розсіяння в волокні	Протяжні інфраструктури (трубопроводи)
FBG-сенсори	Вимірювання деформацій	Контроль конструкцій, сховищ
Гібридні системи	Комбінація FBG + відеоаналітика	Інтелектуальні охоронні комплекси

Розглянемо технології реалізації.

1. Волоконно-оптичні вібраційні сенсори (DAS): засновані на розсіянні Релея. Вони дозволяють виявити й ідентифікувати тип впливу (хода людини, копання, проїзд транспорту) з точністю до кількох метрів по довжині волокна.

2. Сенсори на основі Брегівських решіток (FBG): зміна механічного напруження змінює період решітки Λ , що викликає зсув довжини хвилі Брегівського відбиття [8, 12]:

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

де λ_B – довжина хвилі Брегга;

n_{eff} – ефективний показник заломлення в оптичному волокні;

Λ – період модуляції показника заломлення.

Ці сенсори можуть бути вмонтовані в стіни, плити, люки, й виявляти найменші спроби їх відкрити або зламати.

3. Інтерферометричні системи: підвищена чутливість до фазових змін дозволяє фіксувати навіть найменші коливання – наприклад, звук кроків по поверхні, до якої прикріплено волокно.

Переваги у безпеці:

- розподілена детекція – контроль до 50 км одним каналом;
- висока точність локалізації;

Реальні приклади застосування оптосенсорних технологій у сфері безпеки наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Застосування оптосенсорних технологій у безпеці [5, 6]

Об'єкт	Технологія	Призначення
Нафтогазопроводи	DAS	Виявлення пошкоджень, крадіжок
Аеропорти, вокзали	FBG, інфрачервоні бар'єри	Контроль доступу, периметр охорони
Мости, тунелі	FBG	Структурний моніторинг, запобігання аваріям
Воєнні бази	Інтерферометрія, DAS	Виявлення вторгнення, вібраційний аналіз

2.2 Оптикосенсорні технології в системах навігації

У навігаційних системах оптикосенсори забезпечують надзвичайно точне визначення положення, швидкості, прискорення та орієнтації об'єкта, особливо в умовах, де GPS недоступний або ненадійний.

Основні напрями використання:

- гіроскопи (вимірювання кутової швидкості);
- акселерометри (вимірювання лінійного прискорення);
- інерціальні навігаційні системи (ІНС) – поєднання гіроскопів і акселерометрів;
- волоконно-оптичні гіроскопи (FOG) та лазерні гіроскопи (RLG) – високоточні сенсори для автономної навігації.

Волоконно-оптичний гіроскоп (FOG) ґрунтується на ефекті Саньяка: якщо два світлові промені рухаються в протилежних напрямках по кільцевому волокну, то при обертанні системи між ними виникає фазовий зсув [7, 9]:

$$\Delta\phi = \frac{8\pi A\Omega n}{\lambda c}, \quad (2.2)$$

де A – площа петлі;

Ω – кутова швидкість;

n – показник заломлення;

λ – довжина хвилі світла;

c – швидкість світла.

Порівняння основних типів гіроскопів, що використовуються для навігаційних задач, наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння гіроскопів для навігації [7, 8, 9]

Тип гіроскопа	Принцип дії	Чутливість	Переваги	Недоліки
Волоконно-оптичний	Ефект Саньяка	Дуже висока	Без обертових частин	Вартість, оптика
Лазерний (RLG)	Саньяк, резонанс	Висока	Точний, надійний	Дорогий, потребує вирівнювання
Механічний	Гіродинаміка	Середня	Недорогий	Зношування, маса
MEMS-гіроскоп	Ємнісна зміна	Середня/низька	Компактний, дешевий	Низька точність

Оптосенсорна інерціальна навігація (INS).

У поєднанні з акселерометрами, FOG або RLG утворюють інерціальні навігаційні системи – автономні пристрої, що обчислюють положення шляхом подвійного інтегрування прискорення і кутових швидкостей [7, 10]:

$$\vec{v}(t) = \int \vec{a}(t)dt, \vec{r}(t) = \int \vec{v}(t)dt, \quad (2.3)$$

Волоконно-оптичні гіроскопи застосовуються в таких галузях:

- авіація – навігація літаків, гелікоптерів, безпілотників (БПЛА);
- морський флот – автономна навігація надводних і підводних човнів;
- космічна техніка – стабілізація орієнтації супутників, космічних апаратів;
- наземні системи – високоточне позиціонування в геодезії, тунелюванні, робототехніці.

Інтеграція оптосенсорних пристроїв з іншими навігаційними технологіями:

- INS + GNSS (GPS, Galileo) – для виправлення похибок;
- INS + LiDAR + камера – у мобільній робототехніці (безпілотні авто);
- INS + магнітометри – у малих дронах.

Застосування оптосенсорів у різних галузях навігації представлено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Застосування оптосенсорів у навігації [7, 10]

Галузь	Технологія	Функція
Авіація	FOG, INS	Орієнтація, стабілізація
Морський транспорт	FOG, DAS	Навігація, контроль корпусу
Робототехніка	INS + FOG + LiDAR	SLAM, автономна навігація
Автомобільна сфера	FOG + GPS	Допоміжна навігація, курсний контроль
Космічні апарати	RLG, FOG	Точне визначення положення

2.3 Приклади промислового, транспортного та медичного застосування

Моніторинг стану конструкцій (Structural Health Monitoring – SHM)

Оптоволоконні сенсори типу FBG та розподілені сенсори на ефекті Бріллюена/Релея застосовуються для:

- контролю напруження в мостах, греблях, вежах;
- виявлення тріщин, деформацій, коливань;
- виявлення вібрацій, небезпечних для технічного ресурсу об'єкта.

Формула для зсуву довжини хвилі в FBG має вигляд [8, 12]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B((1 - p_e) \cdot \varepsilon + \alpha \cdot \Delta T), \quad (2.4)$$

де ε – механічне розтягування;

ΔT – температурна зміна;

p_e – ефективний коефіцієнт Пуассона;

α – температурний коефіцієнт.

Контроль виробничих процесів за допомогою оптосенсорних технологій:

- лазерні сенсори виявляють положення деталей у реальному часі;
- волоконно-оптичні сенсори в агресивних середовищах (підвищена температура, тиск, хімічна активність).

Принцип роботи системи структурного моніторингу багатоповерхового будинку наведено на рисунку 2.1 [17].



Рисунок 2.1 –Принцип роботи системи ШМ в багатоповерховому будинку

Використання оптосенсорних технологій у транспорті.

Авіація та космічна галузь:

- інерціальні навігаційні системи (INS) на базі FOG/RLG – для визначення орієнтації та координат;

- волоконно-оптичні датчики (FBG) — для контролю стану фюзеляжу та крила в реальному часі.

Залізничний транспорт:

- DAS-системи (Distributed Acoustic Sensing) – для виявлення руху потягів і контролю колійних порушень;

- оптосенсорний моніторинг температури рейок і напружень у критичних ділянках колій.

Автомобільна галузь:

- оптичні сенсори в системах ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) для розпізнавання перешкод, утримання смуги тощо;

– інфрачервоні сенсори – у нічних системах виявлення об’єктів.

Застосування оптичних технологій у різних видах транспорту наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Застосування оптичних сенсорів у транспорті [5, 6]

Галузь	Технологія	Призначення
Авіація	FBG, FOG	Орієнтація, моніторинг конструкції
Залізниця	DAS, FBG	Контроль рейок, виявлення поїздів
Автомобілі	IR, LiDAR, FOG	Навігація, допомога водієві, нічне бачення

Застосування оптичних технологій у медицині.

Мікрооптичні сенсори:

– вимірювання артеріального тиску, температури, розтягнення судин (на основі FBG);

– внутрішньосудинні сенсори в катетерах для діагностики серцево-судинних захворювань;

– моніторинг внутрішньочерепного тиску в нейрохірургії.

Ендоскопія та лазерна хірургія:

– оптоволоконні сенсори в ендоскопах для виявлення пухлин через флуоресценцію;

– лазерна термотерапія з одночасним сенсорним контролем температури тканин.

Біофотоніка:

– сенсори на основі SPR (поверхневого плазмонного резонансу) — виявлення онкомаркерів;

– оптичні біочипи для мультиплексного аналізу біологічних зразків;

– флуоресцентні сенсори для візуалізації метаболізму в режимі реального часу.

Інфрачервоні оптичні сенсори:

– безконтактне вимірювання температури (медичні термометри);

– IR-аналізатори для неінвазивного контролю глюкози.

Регенеративна медицина і біоінженерія:

– оптосенсори в біореакторах для моніторингу рН, концентрації кисню та глюкози;

– контроль механічного навантаження в тканинних каркасах за допомогою FBG.

Приклади застосування оптосенсорних технологій у медичній сфері наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Приклади оптосенсорних рішень у медицині [12, 14]

Застосування	Тип сенсора	Призначення
Вимірювання тиску	FBG	Реальне вимірювання кров'яного тиску
Катетери	мікро-оптичні	Моніторинг тиску в режимі реального часу
Оптична біопсія	SPR, спектроскопія	Виявлення клітинних змін

2.4 Інтеграція з цифровими технологіями

Інтеграція оптосенсорів із цифровими технологіями відкриває нові можливості для систем безпеки та навігації: підвищується точність вимірювань, з'являється можливість віддаленого моніторингу, прогнозування та адаптивного керування в режимі реального часу.

Оптична навігаційна сенсорна система наведена на рисунку 2.2 [18, 19].

Цифрова обробка сигналу (DSP).

Сигнали з оптичних сенсорів зазвичай мають форму аналогових змін:

- фазового зсуву;
- зміни інтенсивності;
- зміни довжини хвилі.

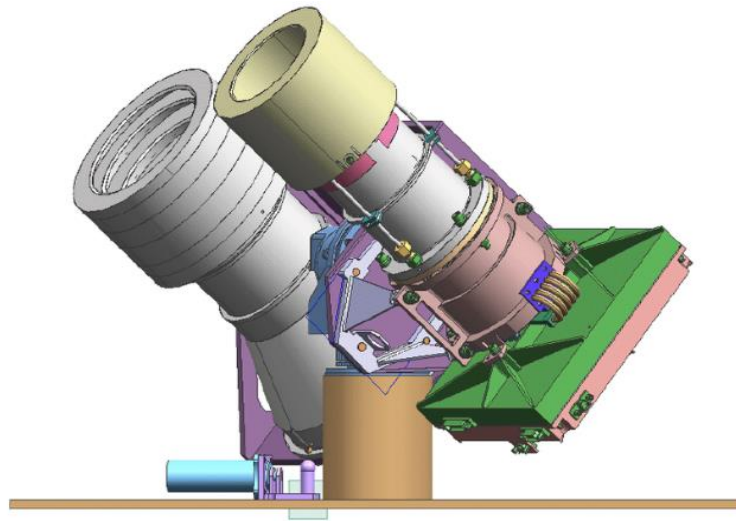


Рисунок 2.2 – Оптична навігаційна сенсорна система

Після аналогово-цифрового перетворення (АЦП) здійснюється цифрова обробка, яка включає: фільтрацію шуму – застосування цифрових фільтрів, таких як:

- швидке перетворення Фур'є (FFT);
- вейвлет-перетворення (Wavelet transform);
- виділення трендів – визначення довготривалих змін фізичного параметра в часі;
- аналіз періодичності – виявлення гармонік, спектральної складової, частотної відповіді системи.

Формула для перетворення Фур'є має вигляд [1, 2]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt, \quad (2.5)$$

де $x(t)$ – сигнал з датчика;

$X(f)$ – його спектральне представлення.

Інтернет речей (IoT) + оптосенсори. Оптосенсори інтегруються в IoT-платформи через контролери (наприклад, RaspberryPi, STM32, Arduino з оптичними модулями). Це дозволяє:

- передавати дані на сервер або хмару;
- візуалізувати дані онлайн (через мобільний застосунок або SCADA).

Автоматизація реагування, наприклад:

- зупинка обладнання при досягненні критичних параметрів;
- надсилання сповіщень оператору або системі керування.

Машинне навчання (ML) для аналізу даних з оптосенсорів.

Приклади застосування методів машинного навчання з оптосенсорними технологіями наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Приклади ML – застосування з оптосенсорами [2, 10]

Галузь	Тип сенсора	Алгоритм	Завдання
Промисловість	FBG	SVM, Decision Tree	Класифікація дефектів в конструкціях
Транспорт	LiDAR	CNN, YOLO	Виявлення та класифікація об'єктів
Медицина	спектроскопія	PCA, k-NN	Виявлення патологій у біозразках

Оптосенсори генерують великі масиви даних – ML дозволяє розпізнавати закономірності, які не видно з традиційного аналізу. Основні приклади застосування:

- класифікація вібрацій: визначення, чи відповідає сигнал нормальній роботі, чи вказує на наявність дефекту;

- прогнозування зношення конструкцій: на основі часових рядів сенсорних вимірювань;

- розпізнавання об'єктів у LiDAR-даних: розрізнення пішоходів, транспортних засобів, стін та інших об'єктів на основі кластеризації та глибинного навчання.

Хмарні та edge-технології:

- Edge-computing – попередня обробка даних здійснюється безпосередньо на сенсорному вузлі → менше навантаження на мережу, менша затримка;

– хмара (Cloud) – довготривале збереження даних, глибока аналітика, навчання моделей ML для подальшої оптимізації систем.

Рівні цифрової інтеграції в оптосенсорних системах представлено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Рівні цифрової інтеграції в оптосенсорних системах [1, 10]

Рівень	Компоненти	Приклад
Сенсорний	FBG, LiDAR, IR	Збір даних з оптоволокна, лазера
Обчислювальний	DSP, FPGA, edge-модулі	Фільтрація, попередній аналіз
Комунікаційний	MQTT, OPC-UA, HTTP, LoRa, 5G	Передача в SCADA або хмару
Аналітичний	ML-моделі, BI-інструменти, SCADA	Прогнозування, візуалізація, тривоги

Оптосенсорні системи реального часу: завдяки розвитку цифрових технологій, оптичні сенсори активно застосовуються у високошвидкісних системах з миттєвим зворотним зв'язком. Приклади:

- автоматичне гальмування – системи на базі LiDAR або фотодетекторів аналізують перешкоди та ініціюють гальмування в мілісекундному масштабі;
- інтелектуальний моніторинг конструкцій – сенсори, вбудовані в інфраструктурні об'єкти (мости, вежі, трубопроводи), виявляють небезпечні коливання, напруження або деформації в реальному часі;
- біофідбек у медицині – волоконно-оптичні сенсори миттєво реагують на зміну тиску, температури або деформації тканин, що критично для операційної медицини та реабілітації.

2.5 Мікромініатюризація, автономність та бездротові рішення

Завдяки досягненням у фотоніці, мікроелектроніці та енергоефективних технологіях оптосенсорні системи стають компактнішими, автономнішими та здатними працювати без фізичного підключення до джерела живлення чи

обчислювального центру. Це особливо важливо у сферах безпеки, оборони, медицини та автономного транспорту.

Мікромініатюризація та автономність оптосенсорних систем:

- мікрооптичні компоненти: мініатюрні дзеркала, лінзи, решітки та хвилеводи виготовляють з використанням технологій MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems).

Фотонні інтегральні схеми (PIC): інтегрують джерела випромінювання, сенсорні елементи та фотодетектори на одному чипі.

Переваги:

- зменшення габаритів;
- покращення стабільності сигналу;
- зниження енергоспоживання.

Приклад: чип на основі SiN (нітрид кремнію), розміром 3×3 мм, що виконує роль спектрометра в навігаційному сенсорі.

Автономні сенсорні модулі:

- джерела живлення: кнергозбирання (Energy Harvesting) – використання вібрацій, тепла, світла для живлення сенсора;
- мікроаккумулятори, зокрема Li-ion ємністю до 100 мА·год, забезпечують кілька діб роботи в енергоощадному режимі.

Низькоспоживчі протоколи:

- BLE (Bluetooth Low Energy);
- ZigBee;
- LoRaWAN для дальнього радіозв'язку з мінімальним споживанням енергії.

Бездротові рішення в оптосенсоріці: передача даних: оптосенсори інтегрують модулі Wi-Fi, BLE, 5G, які дозволяють:

- віддалене керування та моніторинг;
- об'єднання у mesh-мережі;
- хмарне збереження та аналіз.

IoT-архітектура та її комбінація:

- комбінація: оптосенсор + MCU + модуль зв'язку → відправка даних на шлюз (gateway) → хмара.

Приклади мініатюрних оптосенсорних рішень наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Приклади мініатюрних оптосенсорних рішень [8, 12, 14]

Тип сенсора	Розміри (мм)	Потужність споживання	Комунікація	Застосування
Інтерферометр на чипі	3 × 3	< 10 мВт	Wi-Fi/BLE	Навігація БПЛА, біомоніторинг
Мікро-FBG	1 × 5	пасивний	LoRa	Вібраційний моніторинг мостів
ІЧ-сенсор	4 × 4	1 мВт	ZigBee	Автоматичне виявлення вторгнень

Технології енергозбирання для автономних оптосенсорів наведено в таблиці 2.10 [12, 14].

Таблиця 2.10 – Технології енергозбирання для автономних оптосенсорів

Тип енергії	Принцип	Вихідна потужність	Застосування
Світлова	Фотогальваніка	10–100 мкВт/см ²	Сенсори на вулиці, дрони
Теплова	Термоелектричні ГЕН	1–20 мкВт/К	Інфраструктура (трубопроводи)
Вібраційна	П'єзоелементи	10–500 мкВт	Рухомі частини в транспорті

Застосування в безпеці та навігації:

- автономні сенсорні вузли для моніторингу периметра або конструкцій (наприклад, мостів, хмарочосів);
- мікросенсори для дронів – низька вага та споживання, можливість багатоточкового моніторингу;
- носимі сенсори для солдатів або рятувальників – виявлення CO₂, зміни температури, пульсу тощо.

Приклад використання оптичних сенсорів у системах охорони житла наведено на рисунку 2.3 [18].



Рисунок 2.3 – Ілюстрація застосування оптичних сенсорів у системах охорони житла: сучасна охоронна панель з оптосенсорами U-Prox, інтегрована в систему безпеки для приватного будинку

2.6 Перспективи впровадження в критичні сфери

Оптосенсорні технології демонструють високий потенціал до впровадження у критичних сферах завдяки своїй чутливості, надійності, електромагнітній сумісності та можливості дистанційного моніторингу. Це особливо важливо для об'єктів стратегічного призначення, де стійкість систем безпеки чи навігації є критичною.

Енергетика та ядерна промисловість: оптичні волоконні сенсори (FOS) не чутливі до електромагнітних завад, тому придатні для:

- моніторингу температури ядерного реактора;
- контролю тиску та деформацій трубопроводів;
- виявлення витоків та механічних напружень у режимі 24/7.

Формула для деформацій [8, 9, 12]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.6)$$

де ε – відносна деформація;

ΔL – зміна довжини волокна;

L – початкова довжина.

Наприклад, сенсор на основі FBG (Fiber Bragg Grating) змінює довжину хвилі відбитого світла при деформації, що дозволяє точно визначити навантаження.

Авіація та аерокосмічний сектор: в умовах високих навантажень, вібрацій, температур і обмежень ваги оптосенсори забезпечують:

- виявлення мікротріщин у крилах і фюзеляжі;
- моніторинг перегріву елементів двигунів;
- визначення положення елементів шасі чи кермових поверхонь.

Порівняння характеристик оптосенсорів та традиційних датчиків для навігації наведено в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11–Переваги оптосенсорів в навігації [5, 7, 8, 9]

Характеристика	Оптосенсори	Традиційні датчики
Стійкість до ЕМ-поля	Висока	Низька
Вага	Дуже мала	Вища
Вибухобезпечність	Так	Частково
Робочі температури	до 800 °С (залежно від складу волокна)	150–200 °С

Військова справа та стратегічна безпека:

– сучасні розвідувальні системи, протидиверсійні засоби, засоби контролю периметра дедалі частіше базуються на оптичних сенсорах.

Наприклад:

– розтяжки з волоконно-оптичним тросом, що виявляють вібрації чи деформації;

– лідарні приціли;

– багатоканальні оптичні системи в БПЛА.

Формула для сигналу FBG-сенсора при зміні температури наведена, зокрема, у працях [8, 9, 12]:

$$\Delta\lambda = \lambda_0(\alpha + \xi)\Delta T, \quad (2.7)$$

де λ_0 – початкова довжина хвилі;

α – коефіцієнт термічного розширення волокна;

ξ – коефіцієнт термооптичного ефекту;

ΔT – зміна температури.

Медична сфера (біобезпека та моніторинг пацієнтів): мікрооптичні сенсори здатні:

– безперервно вимірювати артеріальний тиск, кисень, пульс;

– реєструвати коливання температури з точністю до 0,1 °С;

– працювати імплантовано або носимо, без джерела живлення – через оптичне волокно.

Основні сфери критичного застосування оптосенсорів у медицині наведено в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Сфери критичного застосування в медицині [12, 16]

Сфера	Тип сенсора	Призначення
Інтенсивна терапія	FBG-сенсори	Контроль тиску в судинах
Нейрохірургія	Інтерферометричні сенсори	Моніторинг внутрішньочерепного тиску
Біоімпланти	Мікрооптичні резонатори	Вимірювання рН і глюкози

Інфраструктурні об'єкти критичного значення включають:

– мости, тунелі, греблі;

– залізничні та транспортні вузли;

– хмарочоси та аеропорти.

Волоконно-оптичні сенсори здатні забезпечити розподілений моніторинг (DistributedSensing), з точністю до 1 м на кілька десятків км волокна.

Оптосенсорні технології відповідають зростаючим вимогам до надійності, масштабованості та безпеки в критичних системах. Їх подальший розвиток і інтеграція з цифровими платформами (зокрема через IoT та 5G) відкриває шлях до повністю автономних, самодіагностичних систем майбутнього.

ВИСНОВКИ

У межах виконаної кваліфікаційної роботи було розглянуто оптосенсорні технології, зокрема волоконно-оптичні сенсори, як ефективні засоби моніторингу, контролю та забезпечення безпеки і навігації. Було проведено теоретичний аналіз фізичних основ функціонування оптосенсорних систем, зокрема механізмів взаємодії світла з матеріальним середовищем, таких як поглинання, відбиття, заломлення та розсіювання.

Досліджено принципи роботи сенсорів, що базуються на інтерферометрії та бреггівських ґратках. Проаналізовано основні типи волоконно-оптичних датчиків, їх чутливі елементи, джерела випромінювання та фотодетектори. Виявлено вплив зовнішніх факторів на точність вимірювань та роздільну здатність систем.

Розглянуто можливості застосування оптосенсорів у системах безпеки (моніторинг конструкцій, виявлення проникнення, контроль середовища) та навігації (оптичні гіроскопи, акселерометри тощо). Було показано, що волоконно-оптичні технології мають високий потенціал у критичних умовах, завдяки імунітету до електромагнітних завад, точності та мініатюрності.

Особливу увагу приділено тенденціям розвитку галузі, серед яких інтеграція оптосенсорів з цифровими технологіями (Інтернет речей, штучний інтелект), мікромініатюризація, впровадження бездротових рішень та автономність систем.

Таким чином, у процесі виконання роботи були досягнуті поставлені цілі, вирішено низку науково-прикладних завдань, що дозволило отримати цілісне уявлення про сучасний стан, проблематику та перспективи впровадження оптосенсорних технологій у сфері безпеки та навігації.

Отримані результати можуть бути використані як теоретична основа для подальших досліджень і розробки практичних рішень у сфері сенсорних систем нового покоління.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Kinetics of Optical Fibre Sensors URL: https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-basic-principles-and-types-of-fibre-optic-sensors-4_fig2_332974516 (дата звернення: 01.06.2025).
2. Zhihu Blog. Working Principle of Fiber Bragg Grating Sensors. URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/430371974> (дата звернення: 01.06.2025).
3. Integrated Mach–Zehnder Interferometer with Phase Modulation. URL: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-integrated-Mach-Zehnder-interferometer-with-phase-modulation_fig3_3239931 (дата звернення: 01.06.2025).
4. Rehman M.U., Shabbir S., Qureshi M.A., et al. Application of Optical Fiber Sensors in Buildings // Buildings. 2021. Vol. 11, No. 6. Article 263. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/6/263> (дата звернення: 01.06.2025).
5. Pipl.ua. Які види датчиків використовують у системі безпеки і як вони працюють URL: <https://pipl.ua/article/yaki-vidi-datchikiv-vikoristovuyut-u-sistemi-bezpeki-i-yak-voni-pracyuyut> (дата звернення: 01.06.2025).
6. Назаренко Ю.І., Чорний В.В. Оптоелектроніка: підручник. Харків: ХНУРЕ, 2020. 384 с.
7. Яковенко Б.П., Черненко А.М., Андрієнко Л.О. Фізика твердого тіла. Київ: КНУ ім. Т. Шевченка, 2019. 314 с.
8. Lee B. Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors // Optical Fiber Technology. 2003. Vol. 9, No. 2. P. 57–79
9. Tang J., Li Q., Zhang Y. Distributed Fiber Optic Sensing for Perimeter Security Applications // Journal of Lightwave Technology. 2020. Vol. 38, No. 24. P. 6701–6711.
10. Merayo J.M.G. Fiber Optic Gyroscopes: Principles and Applications // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 6. P. 2058.
11. Rao Y.J. In-Fibre Bragg Grating Sensors // Measurement Science and Technology. 1997. Vol. 8, No. 4. P. 355–375.

12. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. Boston: Artech House, 2014. 374 p.
13. Shao L., Wang Z., Liu Y. Recent Advancements in Fiber-Optic Sensor Technology for Structural Health Monitoring // *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 4. Article 1344.
14. Kuang K.S.C., Cantwell W.J., Chio W.H. Optical Fibre Sensors for Structural Health Monitoring: A Review of Recent Developments // *Journal of Sensors*. 2012. Vol. 2012. Article ID 718150.
15. Pérez-López J., Díaz I., Cuesta M., et al. Fiber Optic Sensors for Biomedical Applications // *Sensors*. 2017. Vol. 17, No. 3. Article 553.
16. Grattan K.T.V., Meggitt B.T. Optical Fiber Sensor Technology. Vol. 1. Springer Netherlands, 2012. 499 p.
17. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions // *Future Generation Computer Systems*. 2013. Vol. 29, No. 7. P. 1645–1660.
18. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. 800 p.
19. Application of Supercontinuum in Optical Gyroscopy / Yu. S. Kurskoy, O. S. Hnatenko, O. V. Afanasieva // *J. Nano- Electron. Phys.* 2024. Vol. 15, № 6. P. 06023. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(6\).06023](https://doi.org/10.21272/jnep.15(6).06023) (дата звернення 02.06.2025).