

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 другий (магістерський)
СЕНСОР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ РІДИНИ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 курсу, групи ФТОІм-23-1
Куликов Д.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. каф. ФОЕТ Кухтін С.М
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірвальні технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Куликову Даніілу Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Сенсор для вимірювання показника заломлення рідини

затверджена наказом університету від « 22 » листопада 2024 р. № 1230 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 28 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Класифікація і основи роботи волоконно-оптичних сенсорів; сенсори з порушенням повного внутрішнього відбиття; коефіцієнт заломлення світловода $n_1=1,65$; діаграма спрямованості джерела $\varphi = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$; кути при основі призми введення $\alpha=20^\circ-80^\circ$; концентрація етилового спирту у розчині $C = 0 - 85 \%$.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Сучасний стан розвитку волоконно-оптичних сенсорів.

2 Принцип порушення повного внутрішнього відбиття у світловоді.

3 Принцип роботи волоконно-оптичних сенсорів з порушенням ПВВ.

4 Джерела випромінювання і фотодетектори волоконно-оптичних сенсорів.

5 Розрахунок параметрів волоконно-оптичного сенсора з порушенням ПВВ .

6 Моделювання ПВВ сенсору при вимірюванні коефіцієнта заломлення спиртового розчину.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел за тематикою волоконно-оптичних сенсорів	02.09.24–30.09.24	Виконано
2	Огляд особливостей сенсорів з порушенням ПВВ	01.10.24–24.10.24	Виконано
3	Створення математичної моделі датчика	25.10.24–18.11.24	Виконано
4	Моделювання роботи датчику для задач контролю вмісту спирту у розчині і отриманні оптимальних параметрів роботи	19.11.24–28.11.24	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	29.11.24–23.12.24	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	24.12.24–03.01.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	04.01.25–19.01.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.01.25–21.01.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.01.25–29.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач _____
 (підпис)

Керівник роботи _____ ст. викл. каф. ФОЕТ Кухтін С.М.
 (підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 63 с., 41 рис., 1 таблиця, 1 додаток, 22 джерела.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ СЕНСОР, ЗОВНІШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ, КЕРОВАНИЙ СВІТЛОВІД, ПОВНЕ ВНУТРІШНЄ ВІДБИТТЯ, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ, СПИРТ.

Об'єкт дослідження – сенсор з порушенням повного внутрішнього відбиття.

Мета роботи – ознайомлення конструкцією та принципом роботи сенсора повного внутрішнього відбиття, моделювання його роботи при вимірюванні концентрації етилового спирту у розчині.

Метод дослідження – аналітичний та чисельний.

У першій частині розглянуто особливості оптичних волокон і волоконно-оптичних сенсорів на їхній основі

У другій частині проведено аналіз сучасного розвитку волоконно-оптичних сенсорів, їхню класифікацію і принцип роботи.

В третій частині проведено математичне моделювання волоконно-оптичного датчика з порушенням повного внутрішнього відбиття для вимірювання показника заломлення рідин. Визначено оптимальні параметри сенсора..

ABSTRACT

The explanatory slip qualification work: 63 p., 41 fig., 1 table, 1 applications, 22 sources.

ALCOHOL, GUIDED LIGHTGUIDE, INTERNAL REFLECTION, REFRACTION INDEX, TOTAL MEDIUM, FIBER-OPTIC SENSOR.

The research object – sensor based on total internal reflection.

The method of research – analytical and numerical.

The first part accesses the features of optical fibers and fiber-optic based sensors.

The second part provides analysis of current state of fiber-optic sensors, their classification and principle of operation.

The third part provides mathematical modeling of a fiber-optic sensor based on total internal reflection for measuring the refractive index of liquids. The optimal sensor parameters are determined.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Волоконно-оптичні сенсори.....	8
1.1 Особливості оптичних волокон	8
1.2 Особливості і переваги волоконно-оптичних сенсорів.....	12
2. Типи волоконно-оптичних датчиків	18
2.1 Волоконно-оптичні датчики засновані на зміні інтенсивності випромінювання	18
2.2 Спектральні волоконно-оптичні сенсори	25
2.3 Інтерферометричні волоконно-оптичні сенсори	30
3 Модель сенсора для вимірювання показника заломлення рідини	35
3.1 Опис пристрою	35
3.2 Вимоги до елементної бази пристрою	36
3.3 Математична модель пристрою.....	38
3.4 Волоконно-оптичні датчики із граничною модуляцією оптичного випромінювання	41
3.5 Розрахунок параметрів керованого світловода.....	48
3.6 Розрахунок параметрів сенсора	52
Висновки	61
Перелік джерел посилання	62
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	64

ВСТУП

Розвиток систем автоматичного контролю і управління різноманітними виробничими процесами багато в чому покладається на досягнення в сфері створення вимірювальних перетворювачів. Багато датчиків перетворювачів сигналів не завжди задовольняють вимогам основних метрологічних характеристик, таких, як рівень чутливості, часу відгуку, довговічність, стабільність роботи, габаритні характеристики, рівень енергоспоживання, сумісність з приладами обробки інформації. Цими вимогами найбільшою мірою задовольняють сучасні волоконно-оптичні сенсори.

В останнє десятиліття сформувався новий напрямок у сфері сенсорної техніки, який заснований на використанні оптичного випромінювання, а також властивостей оптичних середовищ для реєстрації різних фізичних впливів. Розвитку цього напрямку також сприяли досягнення у виробництві волоконних світловодів і їхнього широкого застосування в сфері телекомунікацій [1].

Сучасний розвиток волоконно-оптичних сенсорів йде у напрямку заміни традиційних електронних сенсорів, або по шляху розробки пристроїв, що забезпечують новий функціонал. Ці сенсори мають значні переваги в тих випадках, коли необхідно забезпечити роботу в умовах сильних електромагнітних полів, в агресивних і вибухонебезпечних середовищах. В даний час це основний напрямок розвитку вимірювальних перетворювачів, в рамках якого створені сенсори типу рідини, тиску, сили, переміщення, швидкості, акустичних хвиль, напруженості електричного і магнітного полів і т. д. [2].

1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СЕНСОРИ

Технологія волоконно-оптичних сенсорів розроблялася протягом останніх 40 років. Це призвело до появи різноманітних приладів, зокрема волоконно-оптичних гіроскопів, сенсорів для вимірювання температури, тиску, механічних зсувів, вібрації, появи великої кількості різноманітних зондів хімічних речовин. Волоконно-оптичні сенсори пропонують ряд переваг, серед яких мініатюрні розміри, підвищена чутливість порівняно з існуючими технологічними рішеннями і універсальність, що дозволяє конфігурувати довільні пристрої, спроможні вимірювати велику кількість фізичних величин. Оскільки оптоволоконні сенсори є діелектричними пристроями, їх можна використовувати при високій електричній напрузі, надвисоких температурах, агресивних середовищах. Крім того, вони сумісні з існуючими системами волоконно-оптичного зв'язку та мають можливість здійснювати дистанційне зондування. В останні роки ведуться активні дослідження в сфері розробки нових матеріалів з нелінійними оптичними властивостями, що відкриває нові можливості застосування в фотоніці [3]. Прикладами цих матеріалів є спряжені напівпровідникові полімери, які поєднують оптичні властивості з електричними властивості напівпровідників. Крім того, ці провідні полімери мають фотолюмінісцентні та електролюмінісцентні властивості, що робить їх привабливими для застосування в оптоелектроніці.

1.1 Особливості оптичних волокон

Оптичне волокно стало революційною технологією у світі телекомунікацій через його здатність передавати велику кількість інформації, включаючи відео та інші дані. Волокна, леговані ербієм, можна використовувати як оптичні підсилювачі для збільшення відстані передавання даних. Дослідження в цій галузі дозволили значно розширити спектр застосування оптичних волокон. Це призвело до розробки нового класу пристроїв, таких як волоконні лазери та волоконно-оптичні датчики, які є предметом цієї дипломної роботи.

Оптичне волокно – це оптичний хвилевід циліндричної форми, що зазвичай виготовлений з кварцу (хоча може бути виготовлений із полімерних матеріалів). Типове оптичне волокно складається з трьох основних частин: серцевини, оболонки та захисного покриття. Волокна можуть бути виготовлені в діапазоні розмірів: діаметр оболонки становить 125 мкм, тоді як діаметр серцевини зазвичай коливається від 10 мкм до 50 мкм. Структура оптичного волокна показана на рисунку 1.1. Серцевина являє собою циліндричний стрижень з діелектричного матеріалу i , як правило, виготовлений зі скла. Світло поширюється переважно вздовж серцевини волокна. Оболонка волокна виконана з діелектричного матеріалу із показником заломлення n_2 , меншим, ніж у матеріалу серцевини n_1 . Оболонка, як правило, виготовляється зі скла або пластику. Оболонка зменшує втрату світла, зменшує втрати на розсіювання на поверхні серцевини, захищає волокно від поглинання поверхневих забруднень і додає механічну міцність. Покриття або буфер – це шар пластику, який використовується для захисту оптичного волокна від фізичного пошкодження. Серцевина і оболонка забезпечують умови, необхідні для передавання оптичний сигнал уздовж оптичного волокна.

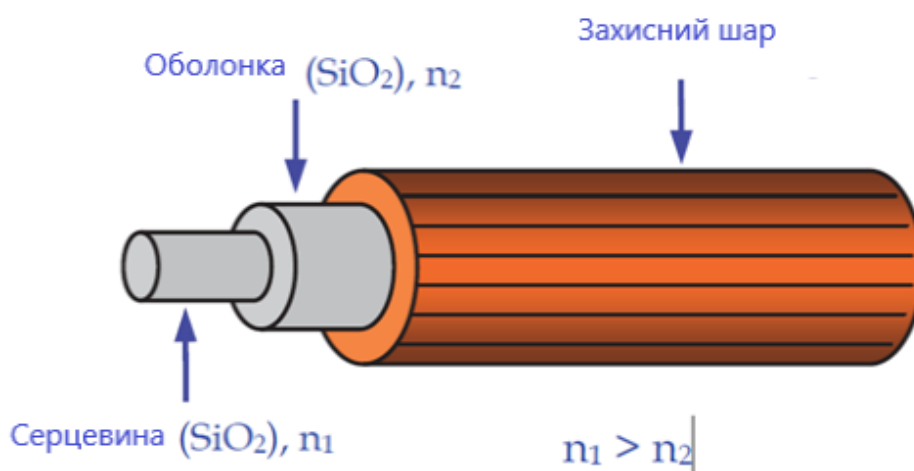


Рисунок 1.1 — Структура типового оптичного волокна

Принцип передачі світла по оптичному волокну базується на ефекті повного внутрішнього відбиття, що пов'язаний з падінням світлового променя на межу розділу двох матеріалів з різним показником заломлення, як показано на рисунку 1.2. Коли світло проходить від середовища з високим індексом заломлення (n_1) до середовища з нижчим індексом (n_2), промінь завжди виходить під кутом φ_2 , більшим за кут падіння φ_1 (рис. 1.2, а). При збільшенні кута φ_1 , настане момент, коли φ_2 дорівнюватиме 90° , в цій точці значення кута падіння відповідає критичному куту φ_c (рис. 1.2, б). Збільшення кута падіння $\varphi_1 > \varphi_c$, призводить до відсутності заломлення світла, і всі промені повністю внутрішньо відбиваються в бік матеріалу з показником заломлення n_1 (рис. 1.2, в).

Щоб промінь був ефективно «локалізований» серцевиною волокна, він повинен потрапити на межу розділу серцевини/оболонки під кутом φ , який перевищує критичний кут φ_c . Цей критичний кут пов'язаний з показниками заломлення сердечника n_1 та оболонки n_2 законом Снелла ($n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2$) і може бути обчислений як $\varphi_c = \arcsin(n_2/n_1)$. Ця вимога означає, що будь-який промінь, що входить в волокно з кутом падіння φ_0 , між 0 і $\pm \theta$ буде внутрішньо відбиватися вздовж серцевини волокна. Цей кут θ відомий як кут введення і пов'язаний з числовою апертурою (NA) оптичного волокна наступним чином: $NA = n_0 \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / 2$, де n_0 – показник заломлення середовища, що оточує оптичне волокно [4].

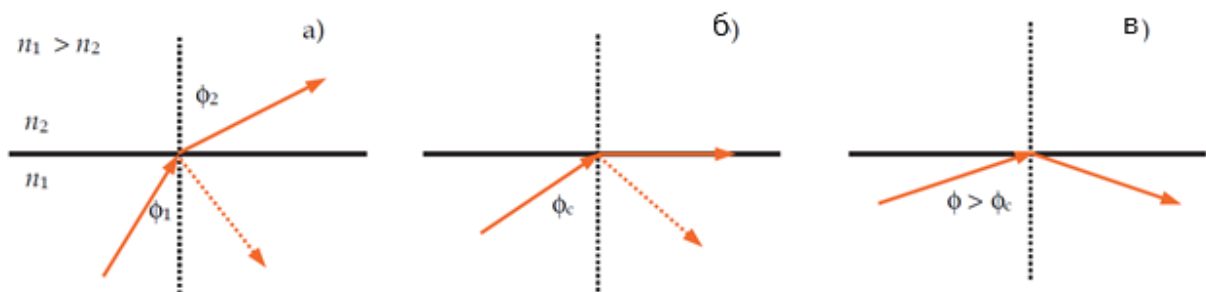


Рисунок 1.2 – Повне внутрішнє відбиття між двома матеріалами з різним показником заломлення

Зазвичай використовуються два типи волокон: волокна зі ступінчастим індексом і волокна з градуїтованим індексом заломлення. У першому випадку показник заломлення серцевини рівномірний і різко змінюється (ступінчато) на межі оболонки. У другому випадку показник заломлення серцевини поступово змінюється, як функція радіальної відстані від центру волокна. Обидва типи волокон також можна поділити на одномодові та багатомодові волокна. Одномодове волокно підтримує лише один спосіб поширення моди, тоді як багатомодові волокна містять велику кількість мод. Однією з основних характеристик оптичного волокна є залежність згасання оптичного випромінювання від довжини хвилі (рис. 1.3).

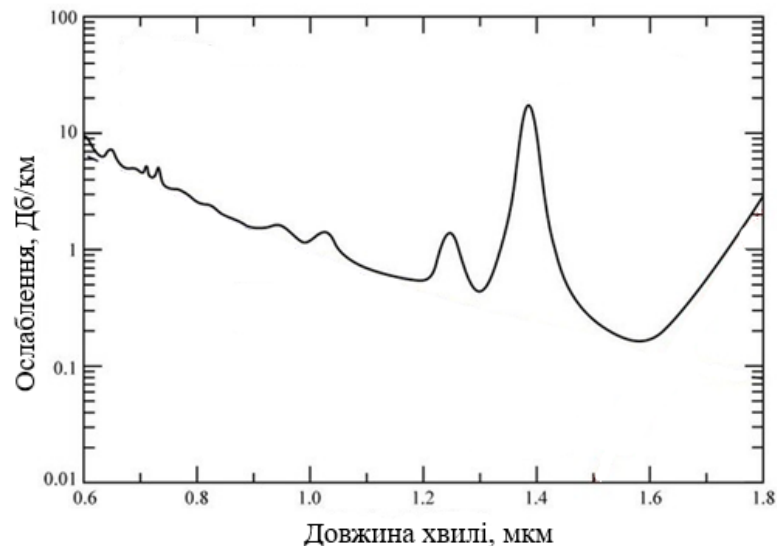


Рисунок 1.3 – Згасання оптичного сигналу в оптичному волокну

Системи оптичного зв'язку працюють в діапазоні з центром 1550 нм, тому що в цій області оптичний сигнал, що передається оптичним волокном, зазнає найменшого згасання. Цей регіон називають третім вікном прозорості. В даний час досліджуються нові матеріали для виробництва оптичних волокон що забезпечують ще менше згасання, дозволяючи значно подовжити лінії передавання даних.

Основними перевагами оптоволоконної технології є низьке згасання, широка смуга пропускання, зменшена вага та розмір, а також стійкість до

електромагнітних перешкод. Сьогодні ведуться активні дослідження волоконно-оптичних пристроїв, що охоплюють оптичні підсилювачі (Erbium Doped Fiber Amplifiers, EDFA), волоконні лазери та волоконно-оптичні сенсори.

1.2 Особливості і переваги волоконно-оптичних сенсорів

В даний час дослідження і розробка новітніх волоконно-оптичних сенсорних пристроїв розширили їх застосування в різноманітних технологічних сферах, включаючи медичну, хімічну, телекомунікаційну сферу та промисловість. На даний час існують волоконно-оптичні датчики для вимірювання широкого спектру фізичних величин, таких як хімічні зміни, вимірювання деформації, електричних та магнітних полів, температури, тиску, обертання, переміщення, зміни показника заломлення, рівня рідини, вібрації, інтенсивності випромінювання, тощо. Волоконно-оптичні датчики – це пристрої, які можуть працювати в суворих умовах, де звичайні електричні та електронні датчики функціонувати не можуть. У порівнянні з іншими типами датчиків, волоконно-оптичні сенсори демонструють ряд переваг; серед яких [5]:

- не є електричними пристроями;
- потребують малих розмірів і ваги кабелю для передачі сигналів;
- можливість створення датчиків мініатюрних розмірів;
- дають змогу проведення вимірювань у важкодоступних місцях;
- в деяких випадках не вимагають безпосереднього контакту з середою що вимірюється;
- дозволяють проводити дистанційні вимірювання;
- стійкі до радіочастотних перешкод та електромагнітних перешкод;
- не забруднюють навколишнє середовище та не піддаються корозії;
- забезпечують високу чутливість, роздільну здатність і високий динамічний діапазон;
- дозволяють проводити вимірювання декількох параметрів одночасно;
- сумісні з існуючими волоконно-оптичними лініями передавання даних.

Волоконно-оптичні сенсори – це діелектричні пристрої, які, як правило, хімічно інертні. Вони не потребують електричних кабелів для їхньої роботи і технічно ідеальні для роботи в умовах агресивних середовищ або корозійних середовищ для задач дистанційного зондування.

Основними компонентами оптоволоконного сенсора є джерело, перетворювач і приймач оптичного випромінювання, як показано на схемі на рисунку 1.4. Лазери або світлодіоди часто використовуються в якості джерел в цих сенсорних пристроях. Оптичне волокно (одномодове або багатомодове), леговані волокна та/або інші матеріали використовуються у якості перетворювача оптичного сигналу. На виході сенсорної системи зазвичай використовується фотодетектор або спектроаналізатор для виявлення зміни параметрів оптичного сигналу, що викликаний фізичним збуренням системи.



Рисунок 1.4 – Основні компоненти оптоволоконного датчика

У волоконно-оптичних сенсорах, оптичні параметри, які можна модулювати є амплітуда, фаза, колір (спектральний сигнал) і стан поляризації. Методи оптичної модуляції датчиків включають наступне:

Зміна амплітуди, що пов'язана з пропусканням, поглинанням, відбиттям або розсіюванням оптичного сигналу. В даний час волоконні бреггівські решітки (FBG) і довгоперіодні волоконні решітки (LPFG) використовуються як сенсорні головки в оптоволоконних сенсорних системах. Оптичні параметри, які можна модулювати для цих датчиків, це довжина хвилі, пропускання і відбиття оптичного сигналу, показника заломлення..

Зміна фази пов'язана зі зміною оптичної частоти і довжини хвилі.

Зміна кольору оптичного сигналу пропорційна змінам поглинання, пропускання, відбиття, або люмінесценції, тоді як поляризація пов'язана з деформацією оптичного волокна.

Принцип модуляції потужності оптичного випромінювання зазвичай асоціюється з перериванням або ослабленням світлового променя що передається оптичним каналом. До таких датчиків безпосередньо можна віднести сенсори типу рідини, вимірювання коефіцієнту заломлення зовнішньої середовища, а також датчики мікропереміщень.

Датчики, засновані на відбитті оптичного випромінювання, використовують два пучки волокон або пару окремих волокон. Один пучок волокон пропускає світло до відбиваючої мішені; інший пучок уловлює відбите світло та передає його на детектор. В цьому випадку зміна інтенсивності оптичного випромінювання, зареєстрована фотодетектором, прямо пропорційна збуренню середовища.

У оптоволоконному сенсорі, який базується на мікрозгинанні, втрачається невелика кількість світла через стінку волокна, якщо волокно зігнуте. Якщо волокно зігнуте через фізичне збурення (наприклад, тиск), то кількість отриманого світла пов'язана зі значенням цього фізичного параметру. До такого класу сенсорів можна віднести датчики тиску та зміщень.

Крім того, серцевина оптичного волокна може бути легована хімічною речовиною. Концепція застосування домішок пов'язана зі спектром поглинання хімічної речовини (домішки), включеної в волокно. Відповідно до характеристик домішки, окремі піки або смуги поглинання залежать від деяких фізичних параметрів, таких як температура. Подібний підхід може розглядатися для вимірювання розсіювання. Подібно до процесів поглинання, у волоконних сенсорах з легованою серцевиною може вимірюватись інтенсивність люмінесценції. У цьому типі оптоволоконних датчиків для стимуляції флуоресценції може використовуватись зовнішнє джерело світла, а безпосередньо на рівень сигналу флуоресценції буде впливати зовнішні фактори, що діють на оптичне волокно. Аналогічно, можна проводити вимірювання зсуву довжини хвилі люмінесценції, як функцію величини збурення зовнішнього

середовища. Інший підхід полягає у впливі показника заломлення на оптичний сигнал, що реєструється. Наприклад зміни показника заломлення та геометричних параметрів брегівської решітки під дією зовнішніх впливів призводить до зміни частотного резонансного піку, і отже, інтенсивності випромінювання (пропущеного або відбитого) на фотодетекторі. Деякі з цих принципів можна використовувати у поєднанні з механізмами модуляції для покращення параметрів оптоволоконних сенсорів.

Оптоволоконні сенсори можна розділити на дві основні категорії: датчики з модуляцією інтенсивності та модуляцією фази.

Сенсори з модуляцією інтенсивності: цей клас датчиків базується на виявленні зміни інтенсивності сигналу, що пропорційний впливу зовнішнього середовища. Модуляція інтенсивності може включати зміни рівня сигналу при проходженні і відбитті, а також втрати при мікровигині оптичного волокна. Для цих задач у оптичне волокно може бути включений відбивач оптичного випромінювання або пропускне середовище чутливе до зовнішніх впливів. Сенсори з модуляцією інтенсивності зазвичай вимагають вищу потужність оптичного випромінювання ніж сенсори з фазовою модуляцією і, як наслідок, потребують волокон з більшим діаметром сердцевини або пучки волокон.

Сенсори з фазовою модуляцією: цей тип порівнює фазу світла в сенсорному волокні до еталонного волокна в пристрої інтерферометричними методами. Загалом, ці сенсори використовують джерело когерентного лазерного світла і два одномодових волокна. Випромінювання від когерентного джерела розділяють на дві частини і вводять у опорні та чутливі волокна. Якщо світло в чутливому волокні піддається зовнішньому впливу, між ними виникає фазовий зсув, який реєструється інтерферометром. Загалом в оптоволоконних датчиках використовуються чотири інтерферометричні конфігурації: Маха-Цендера, Майкельсона, Фабрі-Перо та Саньяка. Конфігурація з інтерферометром Маха-Цандера найбільш широко використовується для акустичного зондування. Датчики з фазовою модуляцією демонструють значно вищу чутливість, ніж датчики з модуляцією інтенсивності.

Загалом волоконно-оптичні сенсори можна зручно функціонально класифікувати за способом використання оптичного волокна на зовнішні і внутрішні.

Внутрішні волоконно-оптичні датчики: у цих датчиках безпосередньо використовується оптичне волокно, як чутливий матеріал, а також як середовище для транспортування оптичного сигналу з інформацією про зовнішній вплив. Принцип роботи цих датчиків полягає в прямій модуляції випромінювання, спрямованого в оптичне волокно [6]. У внутрішніх датчиках фізичне збурення середі призводить до безпосередньої зміни оптичних характеристик волокна і впливу на оптичний сигнал, що цим волокном передається (рис. 1.5, а). Ці датчики можуть використовувати різноманітні інтерферометричні конфігурації, волоконні брегговську структури (FBG), решітки з довгим періодом (LPFG), або спеціальні леговані волокна, що призначені для вимірювання специфічних збурень.

Зовнішній або гібридний волоконно-оптичний датчик: у зовнішньому датчику оптичне волокно застосовується для передачі оптичного сигналу до зовнішньої головки і від неї. Сенсорна головка є зовнішньою по відношенню до оптичного волокна і зазвичай базується на мініатюрних оптичних компонентах, які призначені для модуляції світла у результаті збурення в навколишньому середовищі. Таким чином, у цій конфігурації одне волокно передає оптичну енергію на головку датчика. Потім це світло відповідним чином модулюється та повертається через інше волокно, яке спрямовує його до оптичного детектора. Це принцип роботи датчика на основі передачі інтенсивності. Як альтернатива, модульоване світло може повертатися в те саме волокно шляхом відбиття або розсіювання, а потім спрямовуватися назад до системи детектування (рис. 1.5, б). Оптиковолоконні датчики, внутрішні чи зовнішні, працюють за допомогою модуляції одного (або більшої кількості) параметру оптичного випромінювання: інтенсивності, довжини, поляризації та фази.

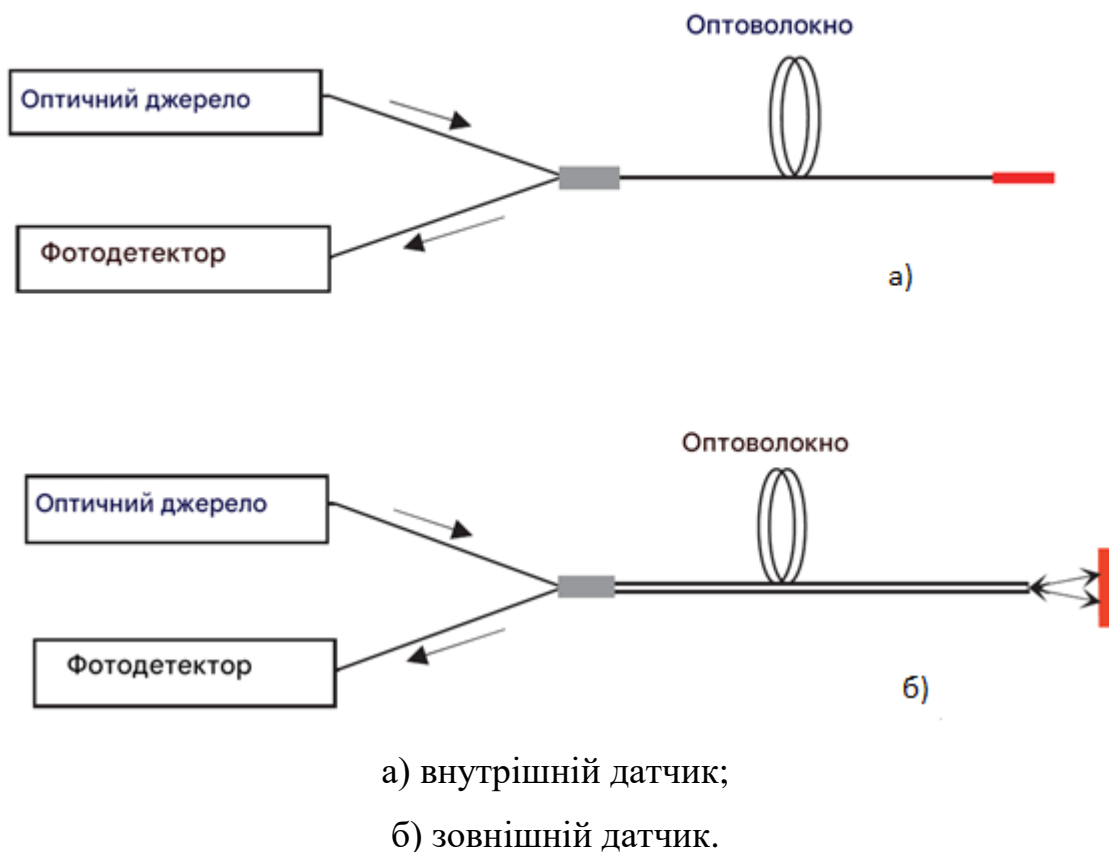


Рисунок 1.5 – Розташування оптоволоконного датчика

На теперішній час волоконно-оптичні сенсори стали важливими елементами сучасних вимірювальних систем, знаходячи незліченну кількість застосувань, наприклад, у автоматизації заводів, автомобільній промисловості, хімічній індустрії, промисловості, сфері телекомунікацій, екологічний моніторинг, медицині та сільського господарства.

2 ТИПИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ

2.1 Волоконно-оптичні датчики засновані на зміні інтенсивності випромінювання

У деяких аспектах найпростішим типом волоконно-оптичних сенсорів є гібридний тип, який базується на модуляції інтенсивності [6, 7]. На рисунку 2.1 показано простий сенсор закриття або вібрації, який складається з двох оптичних волокон, розташованих у безпосередній близькості одне до одного. Світло вводиться в одне з оптичних волокон; коли воно виходить, світло розширюється в світловий конус, кут якого залежить від різниці між показником заломлення серцевини та оболонки оптичного волокна. Кількість світла, захопленого другим оптичним волокном, залежить від його кута приймання та відстані d між оптичними волокнами. Коли відстань d модулюється, це, у свою чергу, призводить до модуляції інтенсивності захопленого світла.

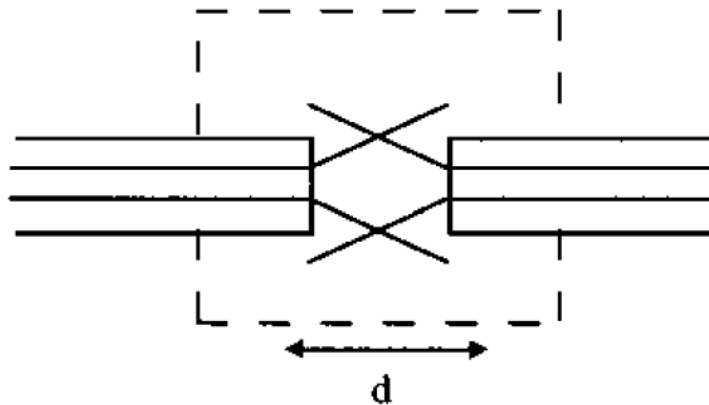


Рисунок 2.1 – Датчик закриття або вібрації заснований на зміні числової апертури

Варіація цього типу датчика показана на рисунку 2.2. Тут використовується дзеркало, яке гнучко монтується, щоб реагувати на зовнішній вплив, наприклад тиск. У міру того, як положення дзеркала зміщується, ефективна відстань між оптичними волокнами зміщується, що викликає модуляцію інтенсивності. Ці типи датчиків корисні для таких застосувань, як

закривання дверей, де можна використовувати світловідбиваючу смужку в поєднанні з оптичним волокном, яке вводить і вловлює вихідне відбите світло.

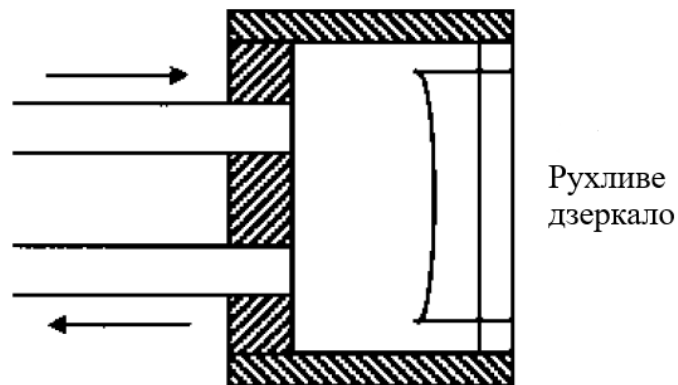


Рисунок 2.2 – Датчик змінної числової апертури для вимірювання тиску і мікропереміщень з рухливим дзеркалом

З двома оптичними волокнами, розташованими в лінію, можна створити простий датчик переміщення, як показано на рисунку 2.3. Вихід від двох детекторів може бути використаний для визначення поступального положення вхідного волокна.

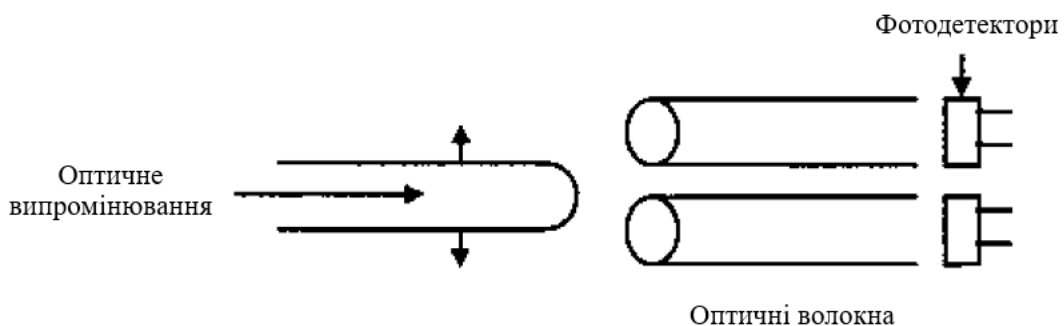


Рисунок 2.3 – Датчик змінної числової апертури для вимірювання тиску і мікропереміщень з рухливим дзеркалом

Також знайшли застосування ротаційні та лінійні волоконно-оптичні датчики положення для підтримки таких застосувань, як *fly-by-light* [8, 9]. Ці датчики дозволяють усунути вплив електромагнітних перешкод для підвищення безпеки та зменшити потреби в екрануванні, що дозволяє значно зменшити

вагу. На рисунку 2.4 показаний поворотний датчик положення [9], який складається з пластини з ділянками зі змінним показником відбиття, розташованими так, що кожна позиція має свій унікальний код. Серія оптичних волокон використовується для визначення наявності або відсутності оптичного випромінювання на окремих ділянках.

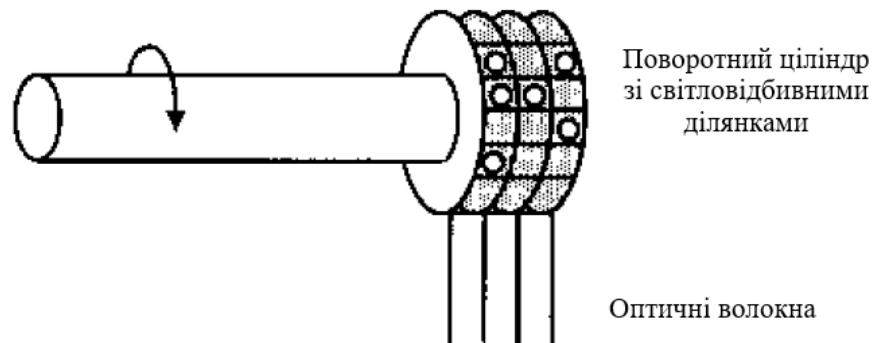


Рисунок 2.4 – Волоконно-оптичний поворотний сенсор положення на основі коефіцієнта відбиття, який використовується для вимірювання обертання валу

Приклад лінійного сенсора положення, що використовує мультиплексування за довжиною хвилі, проілюстровано на рисунку 2.5. Тут широкопasmове джерело світла, яким може бути світловипромінюючий діод, використовується для спрямування випромінювання до оптичної системи. Одне оптичне волокно використовується для передачі світлового променя до елемента мультиплексування за довжиною хвилі, який розділяє світло по окремим волокнам, які використовуються для зчитування карти кодера і визначення лінійного положення. Поля на картці на рисунку 2.5 представляють області з високим коефіцієнтом відбиття, тоді як решта картки має низький коефіцієнт відбиття. Відбиті сигнали потім рекомбінуються та розділяються другим елементом мультиплексування за довжиною хвилі, щоб кожен запитуючий волоконний сигнал зчитувався окремим детектором.

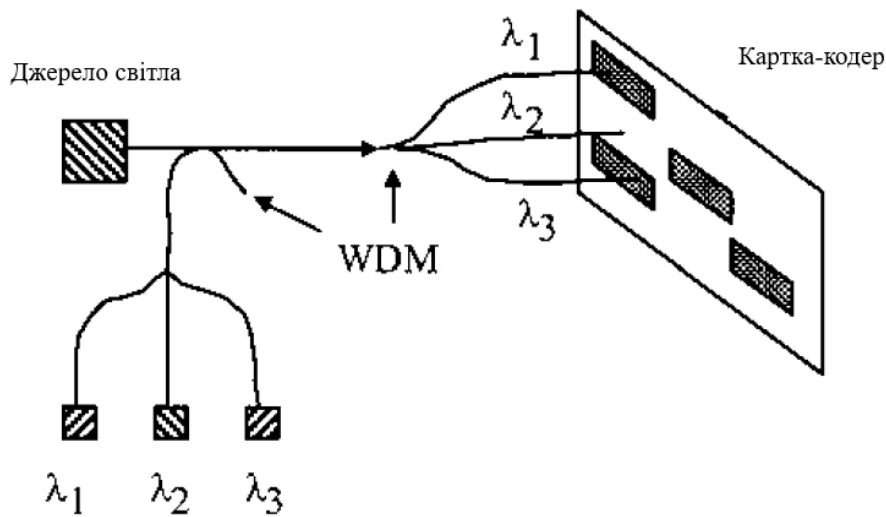
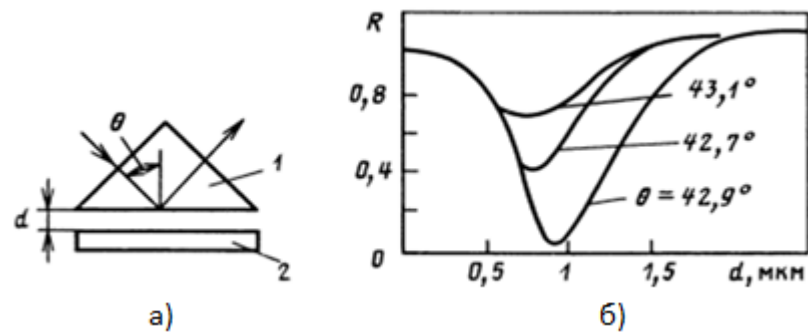


Рисунок 2.5 – Детектор переміщень з мультиплексуванням по довжині хвилі і картой-кодером

Інший клас волоконно-оптичних сенсорів інтенсивності заснований на принципі порушення повного внутрішнього відбиття.

Яскравим прикладом такого сенсора є сенсор мікропереміщень на основі ефекту тунелювання світла і модуляції коефіцієнту відбиття оптичного сигналу від розміру зазору між скляною призмою повного внутрішнього відбиття і відбивачем. Принцип роботи такого сенсора полягає в наступному. При збільшенні зазору між призмою і відбивною пластиною буде порушуватись ефект повного внутрішнього відбиття і кількість випромінювання, що тунелюється з призми. Таким чином, відстань між призмою і відбивною пластиною може вимірюватись по втратах оптичного випромінювання. Зазор можна змінювати за допомогою п'єзоелектричних пристроїв і акустичних полів. На рисунку 2.6 показано оптичний датчик мікропереміщення на основі ефекту тунелювання світла і залежності коефіцієнта відбиття сигналу від розміру зазору між скляною призмою і відбивною пластиною.



а) – скляна призма ПВВ;

б) – срібна плівка.

Рисунок 2.6 – Оптичний сенсор мікропереміщення на основі ефекту тунелювання світла і залежності коефіцієнта відбиття оптичного сигналу від розміру зазору між скляною призмою ПВВ і відбивною пластиною

На рисунку 2.7 показано сенсор на основі оптичного волокна зі скошеною кінцівкою. В цьому сенсорі світло поширюється по серцевині волокна і потрапляє на скошений кінець волокна. Якщо середовище, в яке поміщається скошений кінець волокна, має досить низький рівень коефіцієнт заломлення, тоді практично все світло відбивається, коли воно потрапляє на дзеркальну поверхню і повертається назад через волокно. Проте, якщо показник заломлення середовища починає наближатися до показника заломлення скла, частина світла виходить з оптичного волокна та втрачається, що призводить до модуляції інтенсивності.

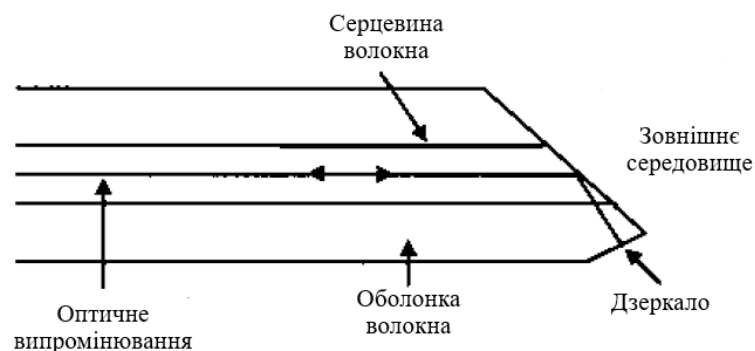


Рисунок 2.7 – Волоконний сенсор, що використовує властивості критичного кута для вимірювання тиску/індексу заломлення

Цей тип сенсора можна використовувати для вимірювання тиску або змін показника заломлення рідини або гелю з низькою роздільною здатністю і точністю від 1 % до 10 %. Варіанти цього методу також використовувалися для вимірювання рівня рідини, як показано на конфігурації зонда на рисунку 2.8. Коли рівень рідини потрапляє на відбиваючу призму, світло просочується в рідину, значно послаблюючи сигнал.

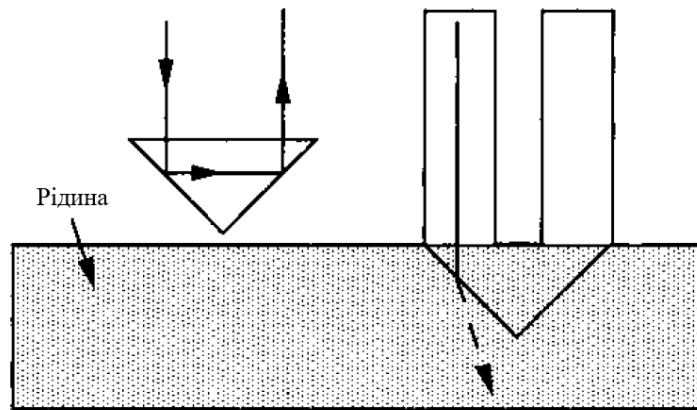


Рисунок 2.8 – Датчик рівня рідини на основі повного внутрішнього відбиття виявляє наявність або відсутність рідини за наявності або відсутності зворотного світлового сигналу

Обмеження світлового променя, що поширюється, в області серцевин волокон і передача потужності від двох близько розташованих серцевин волокон можуть бути використані для створення серії волоконних сенсорів на основі згасання поля [10]. На рисунку 2.9 показано дві серцевини волокна, що розміщені в безпосередній близькості одна до одної. Для одномодового оптичного волокна ця відстань становить від 10 мкм до 20 мкм. Коли використовується одномодове волокно, відбувається значний витік моди світлового променя за межі серцевини в оболонку, або середовище навколо неї. Якщо другу серцевину волокна розмістити поруч, цей швидкоплинний хвіст матиме тенденцію до перехресного з'єднання з серцевиною сусіднього волокна. Розмір перехресного зчеплення залежить від ряду параметрів, включаючи довжину хвилі світла, відносного показника заломлення середовища, в якому розміщені серцевини волокон, відстані між серцевинами та довжина взаємодії.



Рисунок 2.9 – Волоконно-оптичні сенсори на основі перехресного зв'язку між двома близько розташованими оптоволоконними серцевинами

Цей тип волоконного сенсора можна використовувати для вимірювання довжини хвилі, спектральної фільтрації, показника заломлення та впливу навколишнього середовища (температура, тиск і деформація). Складність цього сенсора, яка є спільною для багатьох волоконних датчиків, полягає в оптимізації конструкції таким чином, щоб впливали лише бажані параметри.

Ще один механізм втрати потужності з оптичного волокна – це коли радіус вигину волокна перевищує критичний кут, необхідний для обмеження розповсюдження світла серцевиною, і відбувається витік в оболонку. Місцеве мікрозгинання волокна може спричинити цей процес, що призведе до модуляції інтенсивності світла, що поширюється через оптичне волокно. Була створена серія волоконних датчиків на основі мікрозгинів, для фіксування вібрації, тиску та інших впливів навколишнього середовища [11]. На рисунку 2.10 показано типову схему такого пристрою, що складається з джерела світла, секції оптичного волокна, розташованого в перетворювачі з мікровигинами, призначеному для модуляції інтенсивності світла і детектор. У деяких випадках може використовуватися перетворювач мікровигину, що реалізовано за

допомогою спеціального волоконного кабелю, або оптичного волокна, чутливого до втрат на мікрозгині.

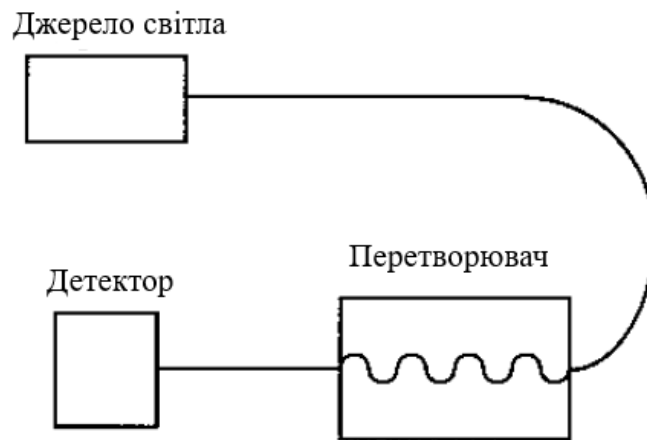


Рисунок 2.10 – Сенсор мікрозгину

Волоконно-оптичні сенсори на основі інтенсивності мають низку обмежень, що накладаються змінними втратами в системі. Потенційні джерела помилок включають змінні втрати через конектори та з'єднання, втрати на мікрозгині, втрати на макрозгині, а також механічна повзучість і зміщення джерел світла та детекторів. Щоб уникнути цих проблем, багато високопродуктивних волоконних датчиків на основі інтенсивності використовують подвійні довжини хвилі. Одна з довжин хвиль використовується для калібрування усіх помилок через небажані варіації інтенсивності в обхід зони чутливості. Альтернативний підхід полягає у використанні волоконно-оптичних сенсорів, які за своєю суттю стійкі до помилок, викликаних коливаннями інтенсивності.

2.2 Спектральні волоконно-оптичні сенсори

Спектральні волоконно-оптичні сенсори застосовують світловий промінь, модульований за довжиною хвилі впливом навколишнього середовища. Приклади цих типів волоконних датчиків включають датчики на основі

випромінювання чорного тіла, поглинання, флуоресценції, еталонів та дисперсійних ґраток.

Одним із найпростіших із цих датчиків є датчик абсолютно чорного тіла (рис. 2.11). Елемент абсолютно чорного тіла розташований на кінці оптичного волокна. Коли елемент підвищує температуру, він починає світитися і діяти як джерело світла. Детектори в поєднанні з вузькосмуговими фільтрами використовуються для визначення профілю кривої абсолютно чорного тіла і, у свою чергу, температури, як показано на рисунку 1.8. Цей тип сенсора був успішно комерційно використаний для вимірювання температури з точністю до кількох градусів під інтенсивними радіочастотними полями. Ефективність і точність цього сенсора краща при вищих температурах і падає при температурах порядку $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ через низьке співвідношення сигнал/шум.

Інший тип спектрального сенсора температури, показаний на рисунку 2.12. Він базується на поглинанні випромінювання. В цьому пристрої сенсорний елемент з арсеніду галію (*GaAs*) використовується в поєднанні з широкосмуговим джерелом світла та оптичними волокнами вхід-вихід. Профіль поглинання сенсорного елементу залежить від температури і може використовуватися для визначення температури.

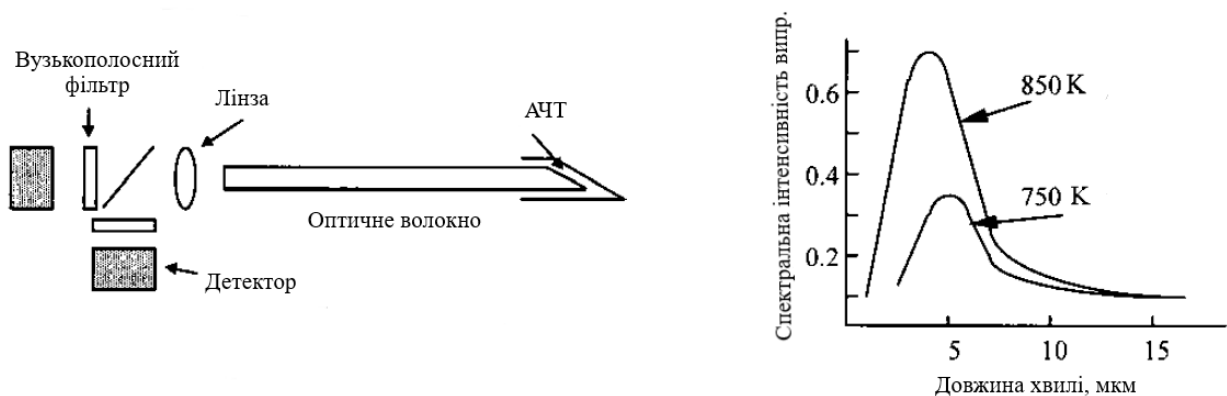


Рисунок 2.11 – Волоконно-оптичні датчики чорного тіла дозволяють вимірювати температуру та є найбільш ефективними при температурах вище $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Криві випромінювання чорного тіла забезпечують унікальні сигнатури для кожної температури

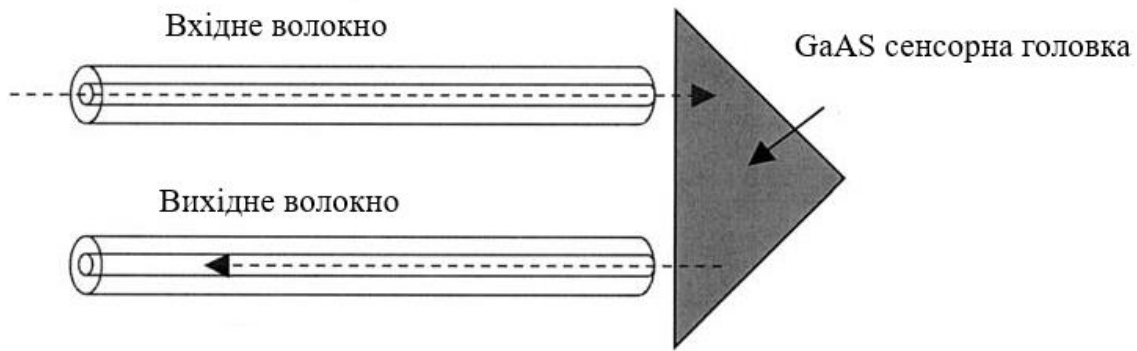


Рисунок 2.12 – Волоконно-оптичний датчик на основі змінного поглинання матеріалів, таких як *GaAs*, дозволяє вимірювати температуру і тиск

Волоконні сенсори на основі люмінесценції широко використовуються в медицині та хімічній галузі, також можуть використовуватися для контролю фізичних параметрів, як температура, в'язкість і вологість. Існує декілька конфігурацій для цих сенсорів, рисунок 2.13 ілюструє дві найбільші поширені. У випадку торцевого сенсора, світло поширюється по волокну до зонду, виконаного з флуоресцентного матеріалу. Результуючий флуоресцентний сигнал вловлюється тим самим волокном, що направлено назад до вихідного демодулятора. Джерело світла може бути імпульсним, з використанням зондів, спрацювання яких залежить від швидкості загасання світлового імпульсу. У безперервному режимі роботи можуть вимірюватись такі параметри, як в'язкість, вміст водяної пари і ступінь затвердіння в армованій вуглецевим волокном епоксидній смолі.

Альтернативою є травлення частини обшивки і заповнення її флуоресцентним матеріалом. Посилаючи світловий імпульс по волокну можна детектувати результуючу флуоресценцію.

Також можливе введення в оптичне волокно флуоресцентних добавок. Цей підхід змушує все оптично активоване волокно флуоресцювати. Використовуючи мультиплексування з часовим поділом, можна використовувати різні області волокна з розподіленим вимірюванням по довжині волокна.

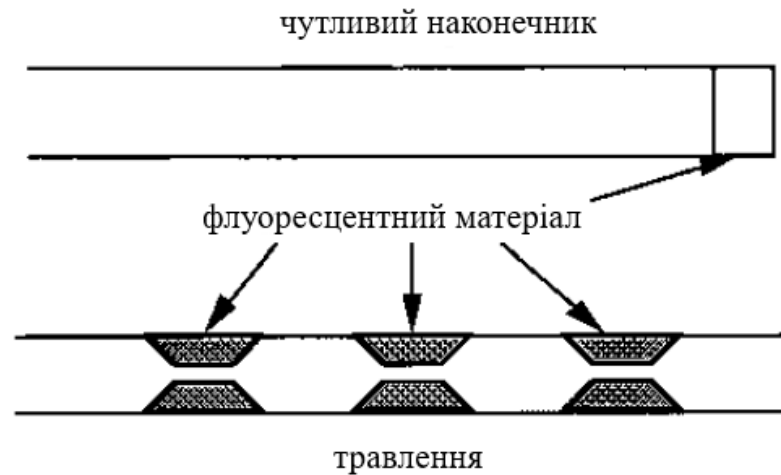


Рисунок 2.13 – Типи флуоресцентних волоконно-оптичних сенсорів

У багатьох випадках користувачі волоконних датчиків хотіли б мати оптоволоконний аналог звичайних електронних датчиків. Прикладом такого датчика є електричний тензодатчик, який широко використовується інженерами-конструкторами. Аналогом є волоконні сенсори з брегівськими решітками з активним шаром від 1 мм до 1 см [12]. Зазвичай чутливість таких сенсорів дорівнює звичайним тензодатчиками.

Цей датчик виготовляється шляхом «вписування» волоконної решітки в сердцевину оптичного волокна, легованого германієм. Це можна зробити кількома способами. Один із методів полягає у використанні двох лазерних променів, розташованих під кутом, для утворення інтерференційної картини в сердцевині оптичного волокна. Інтерференційна картина складається з яскравих і темних смуг, які в свою чергу утворюють локальні зміни показника заломлення в сердцевині волокна. Час витримки для виготовлення цих решіток коливається від хвилин до годин залежно від концентрації домішок у волокні, довжині хвилі лазерного джерела, рівня оптичної потужності.

Інші методи включають використання фазових масок, а також використання коротких лазерних імпульсів високої енергії.

Після виготовлення волоконної решітки наступним важливим питанням є те, як отримати інформацію з такого сенсора. При використанні такої сенсор, зазвичай, прикріплюється до конструкції або вбудовується в неї. Принцип

роботи полягає в наступному, коли активне середовище з брегівською решіткою розширюється або стискається, змінюється період решітки, впливаючи на спектральний відгук.

Для решітки, що розрахована на робочу довжину хвилі 1300 нм, зміна довжини хвилі становить приблизно 10^{-3} нм на мікродформацію. Така роздільна здатність вимагає використання методів спектральної демодуляції, які набагато кращі, ніж ті, що пов'язані зі звичайними спектрометрами. Було запропоновано декілька методів демодуляції з використанням волоконних решіток, еталонів та інтерферометрів [13]. Рисунок 2.14 ілюструє систему, яка використовує еталонну волоконну решітку. Еталонна волоконна решітка діє як модуляційний фільтр. Використовуючи подібні решітки для опорної та сигнальної решіток і регулюючи еталонну решітку для узгодження з активною решіткою, можна реалізувати точну замкнуту систему демодуляції.

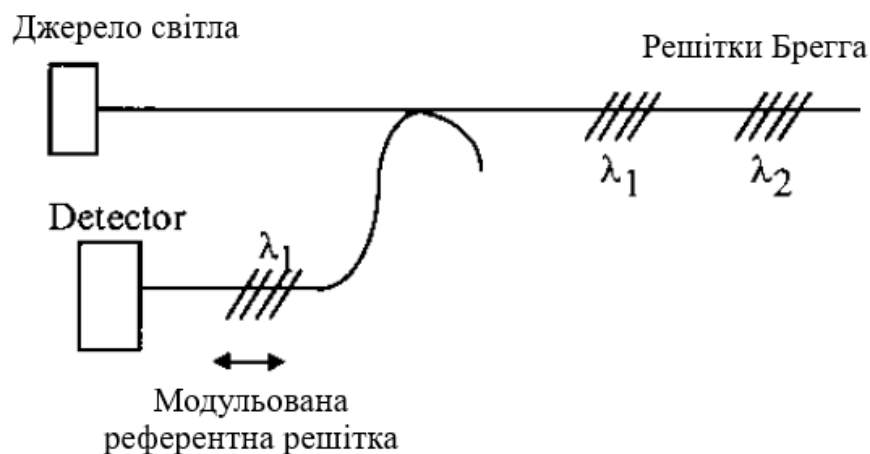


Рисунок 2.14 – Сенсор напруження з решіткою Брегга

Альтернативна система демодуляції може використовувати оптоволоконні еталони, в яких одне волокно можна встановити на п'єзoeлектрик, а інше переміщувати відносно другого кінця волокна. Відстань між кінцями волокна, а також їх відбивна здатність, у свою чергу, визначають спектральну фільтруючу дію еталону.

Також, датчики такого типу активно застосовуються для вимірювання температури. В цьому випадку, зміна температури впливатиме, як на період решітки, так і на показник заломлення шарів. Перевагою таких датчиків є широкий діапазон робочих температур, висока чутливість, а також можливість мультиплексування за довжиною хвилі, що дозволяє реалізувати декілька окремих датчиків на одному волокні [14,15].

2.3 Інтерферометричні волоконно-оптичні сенсори

Однією зі сфер найбільшого інтересу є розробка високопродуктивних інтерферометричних волоконно-оптичних сенсорів. Докладено значних зусиль на дослідження інтерферометрах Саньяка, кільцевих резонаторах, Маха-Цендера та Інтерферометри Майкельсона, а також двомодові, поляриметричні, ґратчасті і інтерферометри на основі еталону.

Інтерферометр Саньяка в основному використовувався для вимірювання обертання [16] і є заміною кільцевим лазерним гіроскопам і механічним гіроскопам. Цей пристрій також може бути використаний для вимірювання ефектів, що змінюються в часі, таких як акустика, вібрація та повільно змінювані явища, такі як деформація. За допомогою кількох конфігурації інтерферометра можна використовувати інтерферометр Саньяка як розподілений датчик, здатний вимірювати амплітуду і місце порушення.

Найбільш важливим застосуванням волоконно-оптичних сенсорів з точки зору комерційної цінності є волоконно-оптичний гіроскопи. Було визнано, що волоконно-оптичний гіроскоп відкриває перспективу створення повністю твердотілого інерційного сенсора без рухомих частин, безпрецедентної надійності та потенціально низької вартості.

Розповсюджені два типи оптоволоконних гіроскопів. Перший тип - волоконно-оптичний гіроскоп із відкритим контуром з динамічним діапазоном від 1000 до 5000 (динамічний діапазон безрозмірний), з точністю масштабного коефіцієнта приблизно 0,5 % (це число точності включає ефекти нелінійності та гістерезису) і чутливістю, яка змінюється від менше ніж 0,01 °/год до 100 °/год і

вище. Ці оптоволоконні гіроскопи зазвичай використовуються для низькозатратних з точки зору вартості застосувань, де динамічний діапазон і лінійність не є ключовими проблемами. Другий тип – це волоконно-оптичний гіроскоп із замкнутим контуром, який може мати динамічний діапазон 10^6 і лінійність масштабного коефіцієнта 10 ppm, або краще. Ці типи волоконно-оптичних гіроскопів орієнтовані в першу чергу на застосування в навігації середньої та високої точності, які мають високі швидкості повороту та вимагають високої лінійності та великих динамічних діапазонів.

В загальному вигляді волоконно-оптичний гіроскоп із відкритим контуром показаний на рисунку 2.15. Широкопasmове джерело світла, таке як світловипромінювальний діод, використовується для спрямування світла до волоконного сполучника вхід/вихід. Вхідний світловий промінь проходить через поляризатор, який використовується для забезпечення взаємності зустрічних променів світла через волоконну котушку. Другий центральний з'єднувач розділяє два світлові промені на волоконно-оптичній котушці, де вони проходять через модулятор, який використовується для генерування вихідного сигналу, що змінюється в часі при обертанні. Модулятор зміщений від центру котушки, щоб створити відносну різницю фаз між світловими променями, що розповсюджуються у зустрічному напрямку. Після проходження через волоконну котушку два світлові промені рекомбінуються, проходять назад через поляризатор і спрямовуються на вихідний детектор.

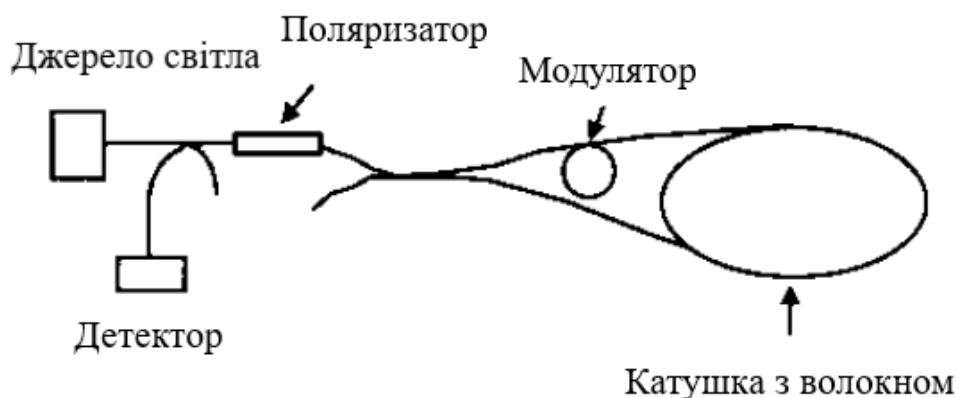


Рисунок 2.15 – Волоконно-оптичний гіроскоп з відкритим контуром

Коли волоконний гіроскоп обертається за годинниковою стрілкою, вся котушка зміщується, трохи збільшуючи час, необхідний світлу для проходження волоконно-оптичної котушки.

Таким чином, світловий промінь, що поширюється за годинниковою стрілкою, має пройти через оптичний шлях, дещо довший, ніж промінь проти годинникової стрілки, який рухається в напрямку, протилежному руху волоконної котушки. Чиста різниця фаз між двома променями пропорційна швидкості обертання.

Інтерферометр Саньяка можна використовувати для інших задач зондування та вимірювання. Приклади включають повільно змінювані вимірювання деформації з роздільною здатністю 100 мк на відстані близько 1 км, спектроскопічні вимірювання довжини хвилі близько 2 нм і характеристики оптичного волокна, такі як теплове розширення з точністю близько 10 ppm [17,18]. У кожному з цих застосувань перетворювачі частоти використовуються в контурі Саньяка для отримання контрольованих зсувів частоти між променями світла, що поширюються назустріч.

Однією з переваг усіх волоконних інтерферометрів, зокрема інтерферометрів Маха–Цендера та Майкельсона [19], є те, що вони мають надзвичайно гнучку геометрію та високу чутливість, що дозволяє використовувати широкий спектр вискоефективних елементів і масивів. На рисунку 2.16 показано основні елементи інтерферометра Маха–Цендера: джерело світла/з'єднувальний елемент, перетворювач і гомодинний демодулятор. Модуль джерела світла зазвичай складається з ізольованого лазерного діода з великою довжиною когерентності, ділільника променів для створення двох світлових променів і засобу спрямування променів до перетворювача. Перетворювач використовується для визначення впливу навколишнього середовища шляхом ізоляції одного світлового променя від впливу навколишнього середовища. Використовуючи вплив навколишнього середовища на перетворювач, індукується оптична різниця довжин шляху між двома променями світла.

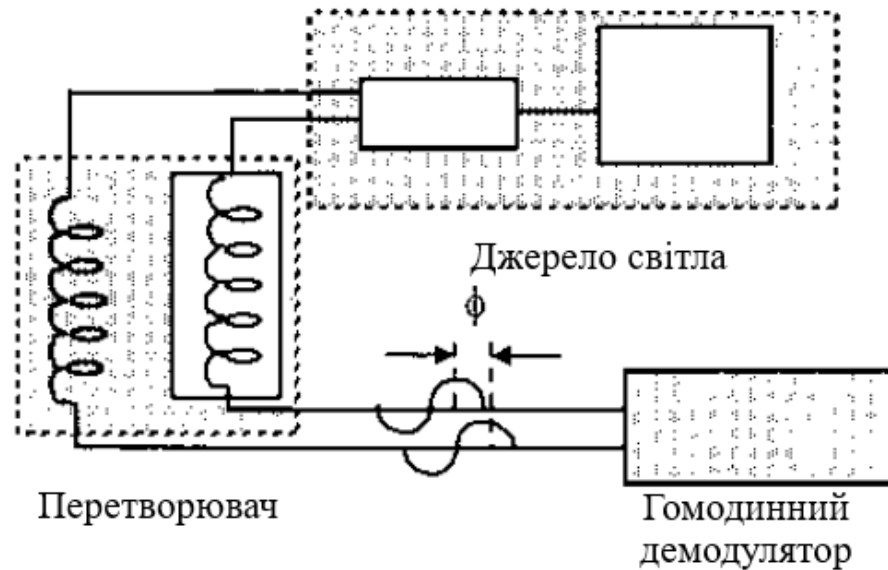


Рисунок 2.16 – Основні елементи волоконного інтерферометра Маха-Зендера

Як правило, для виявлення різниці в довжині оптичного шляху використовується гомодинний демодулятор (також використовуються різні схеми гетеродина). Демодулятор складається з двох паралельних оптичних волокон, які спрямовують світлові промені від перетворювача в лінзу з градуйованим індексом. На виході лінзи створюється інтерференційна картина, яка «рухається» з відносною фазою двох вхідних світлових променів. Якщо розділений детектор використовується з фотошаблоном, розташованим так, що непрозорі та прозорі пари ліній на масці перед розділеним детектором відповідають періодичності інтерференційної картини та зміщені по фазі на 90° на гранях детектора, виходять синусоїдні та косинусові вихідні сигнали. Ці виходи можуть бути оброблені за допомогою електроніки квадратурної демодуляції. Результатом є пряме вимірювання різниці фаз.

Інтерферометр Майкельсона (рис. 2.17) багато в чому схожий на Маха-Цендера. Основна відмінність полягає в тому, що на кінцях ніжок інтерферометра розміщені дзеркала.

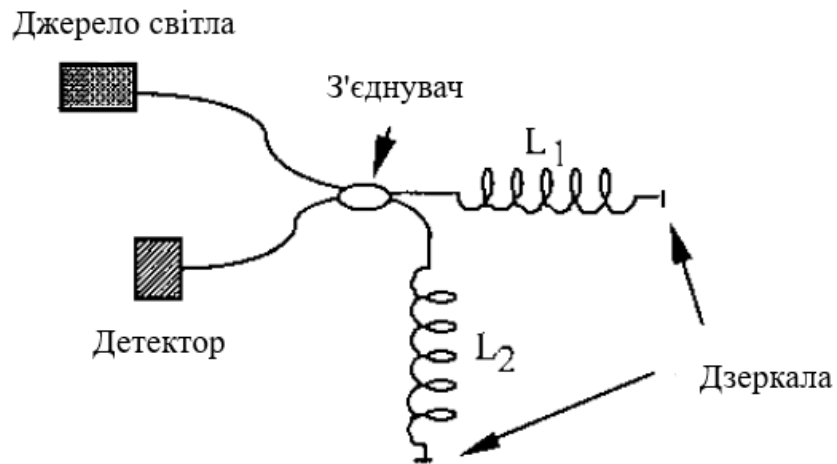


Рисунок 2.17 – Волоконний інтерферометр Майкельсона

Це призводить до дуже високого рівня зворотного відбиття від джерела світла, що значно погіршує продуктивність ранніх систем. Використання кільцевих лазерів на YAG (ітрієвому гранаті) з діодною накачкою як джерела світла значною мірою подолало ці проблеми. З впровадженням фазово-спряжених дзеркал для усунення завмирання поляризації, інтерферометр Майкельсона стає альтернативою для систем, які можуть витримувати відносно високу поточну вартість цих компонентів.

3 МОДЕЛЬ СЕНСОРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ РІДИНИ

3.1 Опис пристрою

Принцип дії волоконно-оптичного сенсору для визначення типу рідини по показнику заломлення полягає в реєстрації зміни інтенсивності оптичного сигналу, що поширюється по світловоду, оптичні властивості котрого залежать від зовнішньої середовища, що оточує світловод. Цей сенсор застосовується для визначення типу рідини за значенням показника заломлення, що є дуже важливим у більшості практичних задач, наприклад, в таких як виявлення конденсату в баках літаків. Робота сенсора типу рідини заснована на відмінності показників заломлення n_2 контрольованих рідин, що призводять до зміни світлопровідності оптичного каналу.

Даний пристрій містить послідовно розташовані джерело випромінювання і плоский світловод, що контактує з середовищем, показник заломлення якого вимірюється. Для підвищення точності ідентифікації, плоский світловод виконано з показником заломлення, що лінійно зменшується від його вхідного торця, і оснащений призми виведення випромінювання та волоконними світловодами. Призми виведення випромінювання розташовані послідовно одна за однією на вільній від контакту з середовищем поверхні плоского світловода, а волоконні світловоди одним кінцем примикають до вихідних граней призм виведення випромінювання. На рисунку 3.1 показана модифікація конструкції датчика, до якої входить: 1 – джерело випромінювання, 2 – плоский світловод, 3 – призми виведення випромінювання, 4 – волоконні світловоди, 5 – індикаторна шкала, 6 – контрольована рідина. Інший варіант реалізації цього датчика включає плоский світловод з незмінним показником заломлення, пари призм вводу/виводу випромінювання в світловодну структуру, джерело випромінювання і фотодетектор. Вимірювання в цьому випадку проводяться по фотоструму фотодетектора замість індикаторної шкали.

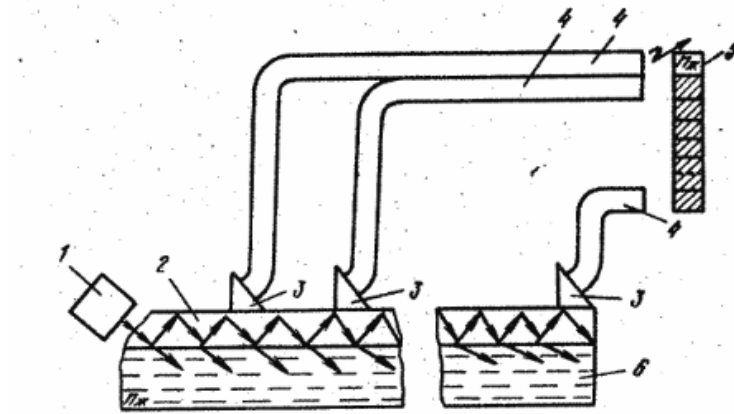


Рисунок 3.1 – Конструкція датчика виду рідини

3.2 Вимоги до елементної бази пристрою

Основні елементи сенсора для вимірювання коефіцієнту заломлення рідини включають оптичне джерело випромінювання, світловодну структуру з оптичними елементами для введення/виведення оптичного випромінювання і фотодетектор.

Джерело випромінювання повинно мати мінімальні габарити, високий ККД, велику потужність випромінювання. Його довговічність повинна перевищити загальну тривалість експлуатації пристрою. Крім того, джерело повинно зберігати працездатність у всіх інтервалах робочої температури.

Спектральний діапазон джерела випромінювання обирається з умов мінімального поглинання світла матеріалом світловода. Існуючі мініатюрні джерела видимого спектру випромінювання мають невелику потужність або недостатню довговічність. Тому доцільно використовувати джерела інфрачервоного випромінювання, що мають невеликі габарити та відносно високу потужність випромінювання [20].

Ширина діаграми спрямованості обирається виходячи з умов отримання високої чутливості та заданого робочого діапазону пристроїв.

Таким чином в даному пристрої можуть ефективно застосовуватись інфрачервоні світлодіоди, лазерні діоди. Введення випромінювання в

світловодну структуру може, також, бути забезпечене безпосередньо з оптичного волокна.

Основною вимогою при виборі фотоприймача є відповідність його спектральної чутливості спектральним характеристикам джерела випромінювання. Для малогабаритних датчиків доцільно використовувати кремнієві фотодіоди, що мають лінійну залежність фотоструму від потужності падаючого випромінювання, високу термостабільність і малий рівень мінімально детектируемой потужності. Задовільнити ці вимоги може, наприклад, фотодіод ФД-20КП з робочою площадкою рівної 4мм і спектральною чутливістю 2 А/Вт [21].

Показник заломлення матеріалу світловода вибирається з умов отримання оптимальних значень коефіцієнта модуляції m . Він повинен бути більшим максимального контрольованого показника заломлення $n_{2 \text{ макс}} = 1,47$. В якості робочого матеріалу обраний світовод БФ28 з показником переломлення $n_1 = 1,6641$.

Для обраної оптичної схеми пристрою центральний луч діаграми спрямованості падає на межу світловод–середовище під кутом падіння θ_1 рівним куту α_0 – кутом на підставі вхідної призми. Кут α_0 і ширина діаграми спрямованості джерела, що характеризуються кутом $\varphi_{\text{дн}}$, обираються з наступних міркувань:

а) промінь, що має мінімальний кут у діаграмі спрямованості джерела випромінювання, падає на межу світловод –зовнішнє середовище під кутом дещо меншим, ніж критичний кут $\theta_{\text{кр min}}$ для мінімального значення показника заломлення n_2 . В цьому випадку практично вся енергія джерела випромінювання лишається у світоводі;

б) промінь, що має максимальний кут в діаграмі спрямованості, падає на межу світловод – середовище під кутом трохи більшим, ніж критичний кут $\theta_{\text{кр max}}$ для максимального значення показника заломлення n_2 . У цьому випадку практично вся енергія джерела випромінювання заломлюється в середовище з рідиною, що вимірюється.

3.3 Математична модель пристрою

В сенсорі вимірювання показника заломлення рідини використовується оптичний світловод і ефект порушення повного внутрішнього відбиття на межі світловод – зовнішнє середовище, що спостерігається при зміні показника заломлення зовнішнього середовища (рис. 3.2). Слід відзначити, що такі зміни можливі в результаті електричного, магнітного, теплового, механічного й іншого видів впливів. Інформація про вплив на зовнішнє середовище (зміна показника заломлення n_2) може бути отримана по зміні коефіцієнта пропускання світловода при порушенні ефекту повного внутрішнього відбиття [21].

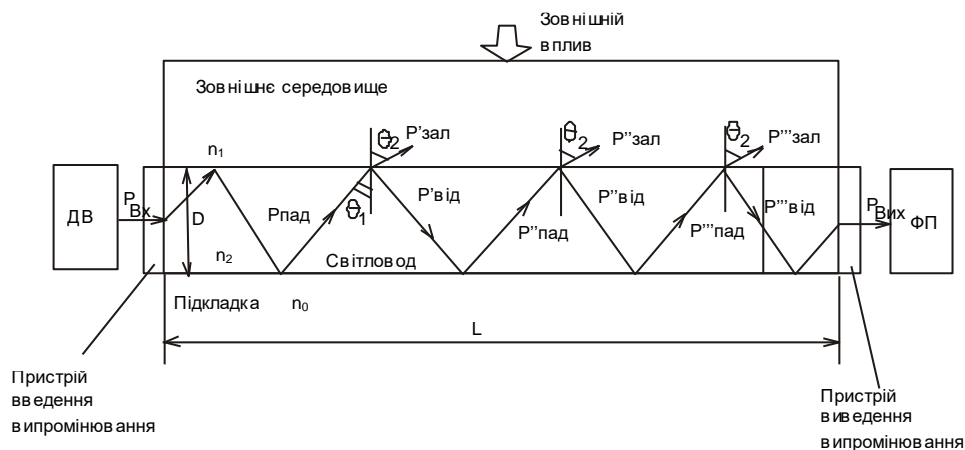


Рисунок 3.2 – Схема модуляції світла шляхом порушення повного внутрішнього відбиття у світловоді

В таких сенсорах застосовуються світловоди, товщина яких значно перевищує довжину хвилі випромінювання. Ефективне керування світловим променем дозволяє використовувати некогерентні джерела випромінювання, у випадку незначних змін показників заломлення матеріалів.

Розглянемо поширення світла у структурі з показником заломлення n_1 при відсутності змін у зовнішньому середовищі, здійснюється завдяки повного внутрішнього відбиття від границь світловод-підкладка (n_1) і світловод-зовнішнє середовище (n_2). Кут θ_1 оберемо рівним критичному куту повного

внутрішнього відбиття $\theta_{1кр}$, причому n_2 більше n_0 , але менше n_1 . В такому випадку:

$$\theta_1 = \theta_{1кр} = \arcsin(n_{20} / n_1), \quad (3.1)$$

де n_{20} – початковий показник заломлення зовнішнього середовища.

Припустимо також, що деякий вплив на зовнішнє середовище (n_{20}) призведе до збільшення її показника переломлення на σn_2 , отже, на границі розділу світловод-зовнішнє середовище не зберегатиметься умова повного внутрішнього відбиття, при якій $\theta_1 < \theta_{1кр}$. Відповідно до формул Френеля й обраними початковими умовами потужність променя, що відбитий від границі світловод-зовнішнє середовище ($P_{від}$):

– для перпендикулярної поляризації:

$$P_{від} = P_{над} \left[\frac{1 - \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{1 + \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2, \quad (3.2)$$

де $P_{над}$ – потужність падаючого випромінювання.

Аналогічно для паралельної поляризації:

$$P_{від} = P_{над} \left[\frac{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} - \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} + \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2, \quad (3.3)$$

для природного світла:

$$P_{\text{від}} = 0.5 \cdot \left[\frac{1 - \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{1 + \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2 \left[\frac{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} - \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} + \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2 \quad (3.4)$$

При цьому потужність заломленого променя:

$$P_{\text{прел}} = P_{\text{над}} - P_{\text{від}} \quad (3.5)$$

Розподіл світлової енергії між заломленим променем і відбитим відповідно до формул (3.2– 3.5) відбувається при кожному відбитті від межі середовищ, що модулюється. Тому, позначивши $P_{\text{від}}^{(\kappa)} = P_{\text{вих}}, P_{\text{над}} = P_{\text{ex}}$, з формул (3.2–3.5) отримаємо:

для перпендикулярної поляризації:

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{ex}} [R_{\perp}(n_{20} + \sigma n_2)]^k, \quad (3.6)$$

$$\text{де } R_{\perp}(n_{20} + \sigma n_2) = \frac{\left[1 - \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}} \right]^2}{\left[1 + \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}} \right]^2},$$

де κ – число відбиттів на границі розділу між світловодом і зовнішнім середовищем.

для паралельної поляризації:

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{ex}} [R_{\parallel}(n_{20} + \sigma n_2)]^k, \quad (3.7)$$

$$\text{де } R_{II}(n_{20} + \sigma n_2) = \left[\frac{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} - \sqrt{\frac{[(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2]}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} + \sqrt{\frac{[(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2]}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2;$$

для природного світла:

$$P_{вих} = 0.5 \cdot P_{ex} \left[(R_{\perp})^k (n_{20} + \sigma n_2) + (R_{II})^k (n_{20} + \sigma n_2) \right]. \quad (3.8)$$

Для плоского світловода, довжиною L і товщиною d число відбиттів дорівнює цілому числу:

$$k = \text{entier} \left(\frac{L}{2d \cdot \tan(\theta_1)} \right). \quad (3.9)$$

З урахуванням початкових умов:

$$k = \text{entier} \left(L \frac{\sqrt{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}{2d \cdot n_{20}} \right). \quad (3.10)$$

3.4 Волоконно-оптичні датчики із граничною модуляцією оптичного випромінювання

При використанні плоского світловода в якості чутливого елемента висувається ряд вимог до складових частин перетворювача. Ці вимоги пов'язані з особливостями схеми модуляції, глибина якої критична до кута поширення випромінювання, а також з тим, що фотоприймач і джерело випромінювання розділені світловодною структурою, довжина якої може досягати декількох десятків міліметрів. У випадку, коли застосовується схема модуляції з відносним показником заломлення, що змінюється, на границі світловодного шару,

необхідно погоджувати не тільки спектральні характеристики елементів, але і діаграму спрямованості джерела із її розташуванням відносно світловодної структури. Ця особливість викликана досить високою чутливістю оптичної схеми до кута падіння випромінювання у світловоді.

Існує залежність між зміною показника заломлення зовнішнього середовища n_2 , необхідним для 100% модуляції світлового потоку, і розбіжністю оптичного пучка джерела. При цьому, чим менше зміна показника заломлення, тим менше і розбіжність пучка. Вимоги по розбіжності пучка пов'язані з тим, що вихідна потужність залежить від кутів падіння $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$ світлового випромінювання на модульовану границю світловода (рис. 3.3).

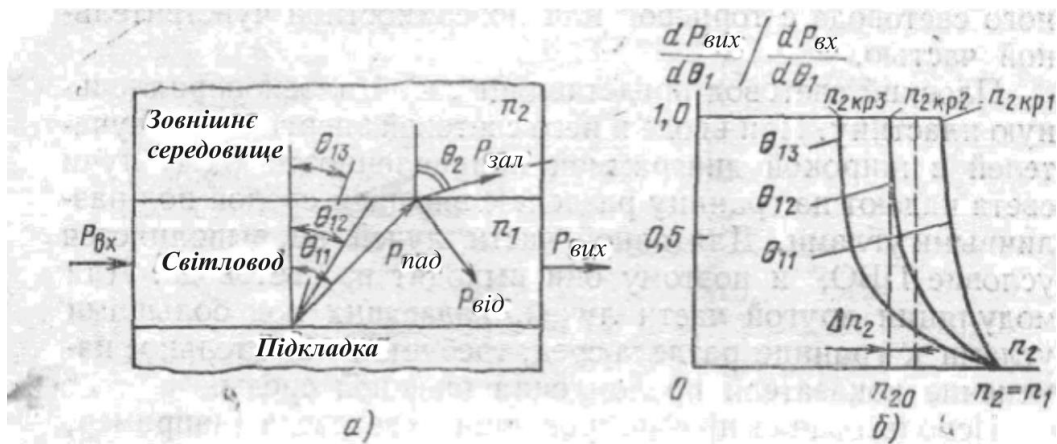


Рисунок 3.3 – Передача випромінювання світловодною структурою

У залежності від кута θ_1 , а також від показника заломлення n_2 , що в свою чергу залежить від зовнішнього впливу, мінятиметься і відносна величина вихідної потужності:

$$\frac{dP_{\text{вих}} / d\theta_1}{dP_{\text{вх}} / d\theta_1},$$

де $dP_{\text{вх}} / d\theta_1$ – частина вхідної потужності, укладеної при розкритті плоского кута $d\theta_1$.

Відносна вихідна потужність при k відбиттів для:

– перпендикулярної поляризації:

$$\frac{dP_{\text{вix}} / d\theta_1}{dP_{\text{ex}} / d\theta_1} = [R_{\perp}(\theta_1, n_2)], \quad (3.6)$$

$$\text{де } R_{\perp}(\theta_1, n_2) = \left[\frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \right].$$

– паралельної поляризації:

$$\frac{dP_{\text{вix}} / d\theta_1}{dP_{\text{ex}} / d\theta_1} = [R_{\parallel}(\theta_1, n_2)], \quad (3.7)$$

$$\text{де } R_{\parallel}(\theta_1, n_2) = \left[\frac{n_2 \cos \theta_1 - \frac{n_1}{n_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_2 \cos \theta_1 + \frac{n_1}{n_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \right].$$

природного світла

$$\frac{dP_{\text{вix}} / d\theta_1}{dP_{\text{ex}} / d\theta_1} = \frac{1}{2} [R_{\perp}^k(\theta_1, n_2) + R_{\parallel}^k(\theta_1, n_2)]. \quad (3.8)$$

Нехай діаграма спрямованості випромінювача задана деякою функцією

$$\frac{dP_{\text{ДВ}}}{d\phi} = f_1(\phi) \quad (3.9)$$

де (ϕ) – кут, утворений променем і віссю випромінювача.

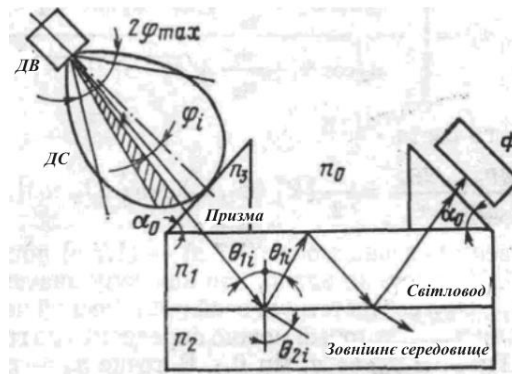


Рисунок 3.4 – Сенсор з введенням випромінювання за допомогою призми

При введенні випромінювання у світловод, наприклад, за допомогою призми (рис. 3.4), діаграма спрямованості випромінювача перетвориться в діаграму спрямованості випромінювання у світловоді, що характеризується кутом θ_1 . При цьому можна записати

$$\frac{dP_{ex}}{d\theta_1} = f_2[\phi(\theta_1)] \quad (3.10)$$

Співвідношення між кутами ϕ і θ_1 з урахуванням показників заломлення призми n_3 і світловода n_1 має вигляд

$$\phi = \arcsin \left\{ n_3 \sin \left[\arcsin \left(\frac{n_1}{n_3} \sin \theta_1 \right) - \alpha_0 \right] \right\} \quad (3.11)$$

де α_0 – кут при основі призми введення.

При введенні випромінювання через повітряний зазор між випромінювачем і призмою і $n_3 = n_1$ з урахуванням формул Френеля і закону Снеліуса діаграма спрямованості у світловоді можна виразити через діаграму спрямованості випромінювача:

$$\frac{dP_{ex}}{d\theta_1} = 0,5 [T_{\perp B} + T_{\parallel B}] f_1 \{ \arcsin [n_1 \sin(\theta_1 - \alpha_0)] \}, \quad (3.12)$$

$$\text{де } T_{\perp B} = \frac{4(\sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \Theta_1'}) \cdot n_1 \cos \Theta_1'}{\left[\sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \Theta_1'} + n_1 \cos \Theta_1' \right]^2},$$

$$T_{\parallel B} = \frac{4(\sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \Theta_1'}) \cdot n_1 \cos \Theta_1'}{\left[n_1 \sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \Theta_1'} + n_1 \cos \Theta_1' \right]^2}.$$

Пропускна здатність на межі розділу повітря-призма введення для перпендикулярної і паралельної поляризації світла відповідно; $\Theta_1' = \theta_1 - \alpha_0$.

Коефіцієнт передачі світла через світловод для широкої діаграми спрямованості випромінювача:

$$\tau = \frac{P_{eux}}{P_{ex}} = \frac{1}{P_{ex}} \int_{\theta_{1min}}^{\theta_{1max}} \frac{dP_{eux}}{d\theta_1} d\theta_1, \quad (3.13)$$

де θ_{1max} , θ_{1min} – граничні кути падіння випромінювання на границю світловоду, що модулюється, обумовлені діаграмою спрямованості у світловоді:

$$\frac{dP_{eux}}{d\theta_1} = \frac{1}{2} \left[R_{\perp}^k(\theta_1, n_2) \frac{dP_{ex\perp}}{d\theta_1} + R_{\parallel}^k(\theta_1, n_2) \frac{dP_{ex\parallel}}{d\theta_1} \right]. \quad (3.14)$$

Кути θ_{1max} і θ_{1min} визначаються через ширину діаграму спрямованості джерела випромінювання, що характеризується кутом $\pm \theta_{max}$:

$$\theta_{1max} = \alpha_0 + \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_{max}}{n_1} \right), \quad (3.15)$$

$$\theta_{1min} = \alpha_0 - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_{max}}{n_1} \right). \quad (3.16)$$

Коефіцієнт τ істотно змінюється при зміні показника заломлення зовнішнього середовища n_2 .

Коефіцієнт модуляції світлового сигналу:

$$m = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max}} = 1 - \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \quad (3.17)$$

де P_{\max} – максимальна потужність;

P_{\min} – мінімальна потужність;

τ_{\max} – максимальний коефіцієнт передачі потужності;

τ_{\min} – мінімальний коефіцієнт передачі потужності.

Потужність P_{\max} визначається при $n_2 = n_{20}$, а P_{\min} – при $n_2 = n_{20} + \sigma n_2$:

$$P_{\max} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вух}}}{d\theta_1} d\theta_1 \Big|_{n_2=n_{20}} \quad (3.18)$$

Наведений інтеграл можна розділити на дві частини:

1) у діапазоні кутів від $\theta_{1\text{кр}} = \arcsin\left(\frac{n_{20}}{n_1}\right)$ до $\theta_{1\max}$, в якому виконується

умова ПВВ:

$$\frac{dP_{\text{вух}}}{d\theta_1} = \frac{dP_{\text{ex}}}{d\theta_1};$$

2) у діапазоні кутів від $\theta_{1\min}$ до $\theta_{1\text{кр}}$ умова ПВВ не виконується і тому:

$$\frac{dP_{\text{вух}}}{d\theta_1} = \left(\frac{dP_{\text{ex}}}{d\theta_1}\right) R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}), \text{ де } R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}) = 0,5 \left[R_{\perp}^k(\theta_1, n_2) + R_{\parallel}^k(\theta_1, n_2) \right].$$

Отже,

$$P_{\max} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}}} \frac{dP_{\text{ex}}}{d\theta_1} \left[R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}) \right] d\theta_1 + \int_{\theta_{1\text{кр}}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{ex}}}{d\theta_1} d\theta_1. \quad (3.19)$$

Аналогічно визначається P_{\min} :

$$P_{\min} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1 \Big|_{n_2=n_{20}+\Delta n_2}, \quad (3.20)$$

або

$$P_{\min} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}\Delta}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} \left[R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20} + \Delta n_2) \right] d\theta_1 + \int_{\theta_{1\text{кр}\Delta}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1, \quad (3.21)$$

$$\text{де } \theta_{1\text{кр}\Delta} = \arcsin\left(\frac{n_{20} + \Delta n_2}{n_1}\right).$$

Якщо випромінювач має Ламбертівський розподіл інтенсивності випромінювання в діапазоні кутів від θ_{11} до θ_{12} , тобто:

$$dP_{\text{вх}} / d = P_0 \cdot \cos,$$

$$\text{де, } P_0 = \begin{cases} \text{const при } \theta_{12} \leq \theta_1 \leq \theta_{11} \\ 0 \text{ при } \theta_1 > \theta_{11}, \theta_1 \leq \theta_{12} \end{cases}.$$

Якщо інтенсивність рівномірна, то $dP_{\text{вх}}/d\theta_1 = P_0$. Отже, коефіцієнт модуляції:

$$m = \frac{\int_{\theta_{1\text{кр}\Delta}}^{\theta_{1\text{кр}\Delta}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1 + \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}\Delta}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20})] d\theta_1 - \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}\Delta}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20} + \Delta n_2)] d\theta_1}{\int_{\theta_{1\text{кр}\Delta}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1 + \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}\Delta}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20})] d\theta_1} \quad (3.22)$$

Формула (3.22) з урахуванням заданої діаграми спрямованості джерела випромінювання дозволяє визначити реальний коефіцієнт модуляції m у досліджуваній схемі.

3.5 Розрахунок параметрів керованого світловода

Розрахунок параметрів вузької світловодної структури слід проводити з визначення показника заломлення матеріалу світловода n_1 . Він обирається з умови знаходження робочої точки на лінійному відрізку функції перетворення $I_{\phi n} = f(n_2)$ і залежить також від ширини діаграми спрямованості світловода. Напівімперична залежність пов'язує показник заломлення матеріалу світловода n_1 , максимальне значення показника заломлення зовнішнього середовища n_{2max} і максимальний курс діаграми спрямованості світловода φ_{dc} .

$$n_1 = \left(1 + \frac{C_n}{\varphi_{dc}} \right) n_{2max},$$

де C_n – постійний коефіцієнт, що залежить від форми керованого світловода.

Для плоских світловодних структур C_n лежить у межах від 3° до 5° . Зважаючи, що максимальний показник заломлення зовнішнього середовища не перевищує $n_{2max} = 1,5$, а кут діаграми спрямованості джерела випромінювання лежить в межах від 10° до 30° , показник заломлення світловода n_1 , може бути обраним від 1,65 до 1,9.

По співвідношеннями (3.2–3.4) був проведений розрахунок відносної потужності $\frac{dP_{\text{вих}}}{dP_{\text{вх}}}$ випромінювання з круговою поляризацією від показника заломлення n_2 , що залежить від зовнішнього впливу на середовища і кількості відбиттів від межі розділу. Кут розповсюдження випромінювання обирався з умови виконання повного внутрішнього відбиття для центрального кута і початкового значення показника заломлення $n_{2min} = 1,3$:

$$\theta_1 = \arcsin \frac{n_{2min}}{n_1}.$$

Результати розрахунків наведені на рисунку 3.5.

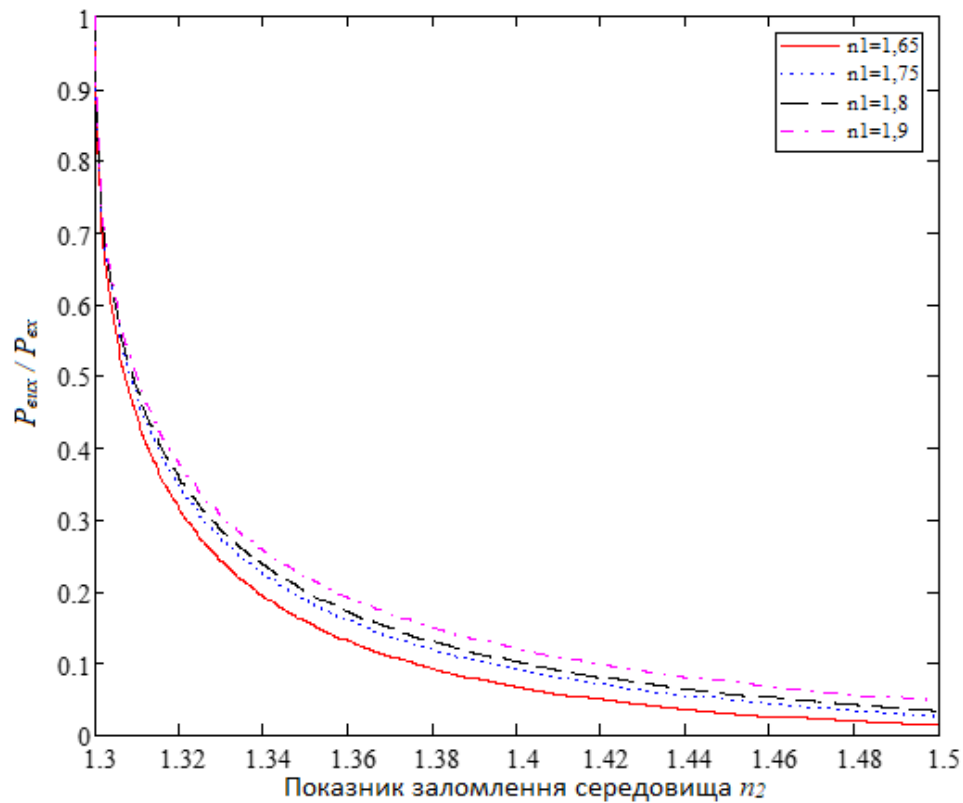


Рисунок 3.5 – Результати розрахунків $\frac{dP_{\text{вих}}}{dP_{\text{вх}}}$ від n_2 при різних n_1 світловода

Як видно з графіків спостерігається експоненцієне зменшення відносної потужності $\frac{dP_{\text{вих}}}{dP_{\text{вх}}}$ від показника заломлення n_2 і показника заломлення світловода n_1 . Максимальна крутизна характеристики спостерігається на ділянці $n_2 = 1,3..1,4$. Вибір максимального значення показника заломлення світловода $n_1=1,9$ дозволяє отримати максимальне значення глибини модуляції, але потребує використання джерела випромінювання з максимальною потужністю випромінювання, а фотодіода з максимальною інтегральною чутливістю.

Залежність відносної потужності $\frac{dP_{\text{вих}}}{dP_{\text{вх}}}$ від кількості відбиттів $k = 1..3$ показано на рисунках (3.6–3.9).

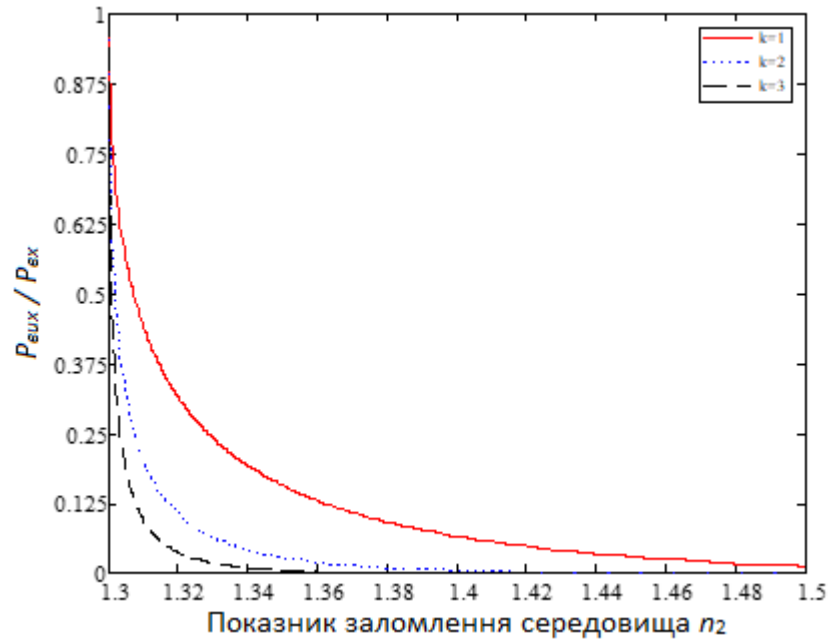


Рисунок 3.6 – Результати розрахунків залежності $\frac{dP_{вих}}{dP_{вх}}$ від n_2 ;
 $n_1 = 1,65$ при $k = 1,2,3$

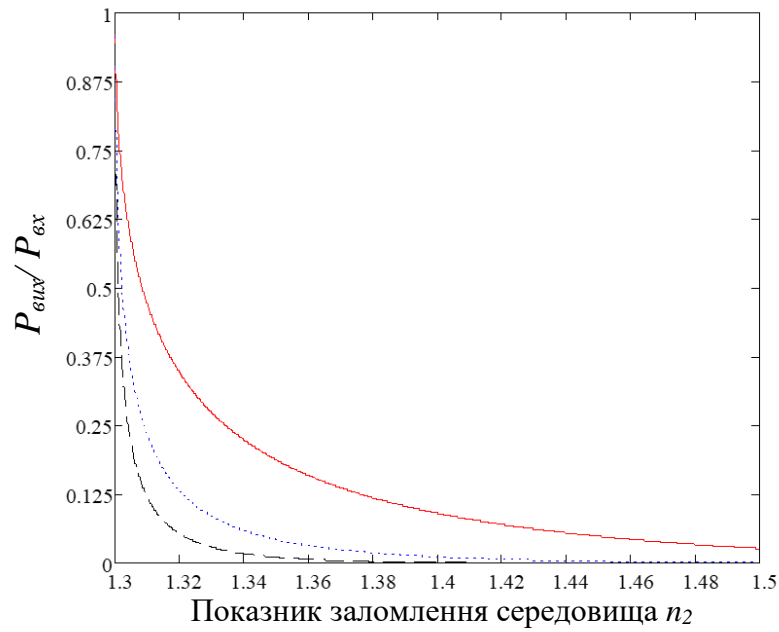


Рисунок 3.7 – Результати розрахунків залежності $\frac{dP_{вих}}{dP_{вх}}$ від n_2 ,
 $n_1 = 1,75$ при $k = 1,2,3$

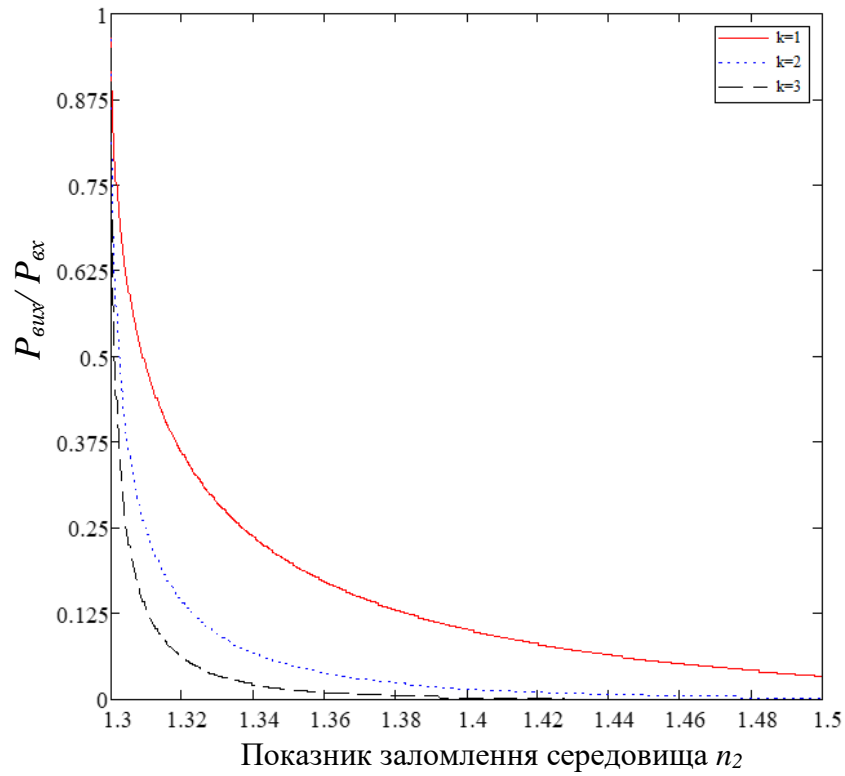


Рисунок 3.8 – Результати розрахунків залежності $\frac{dP_{\text{вух}}}{dP_{\text{вх}}}$ від n_2 , $n_1=1,8$ при $k=1,2,3$

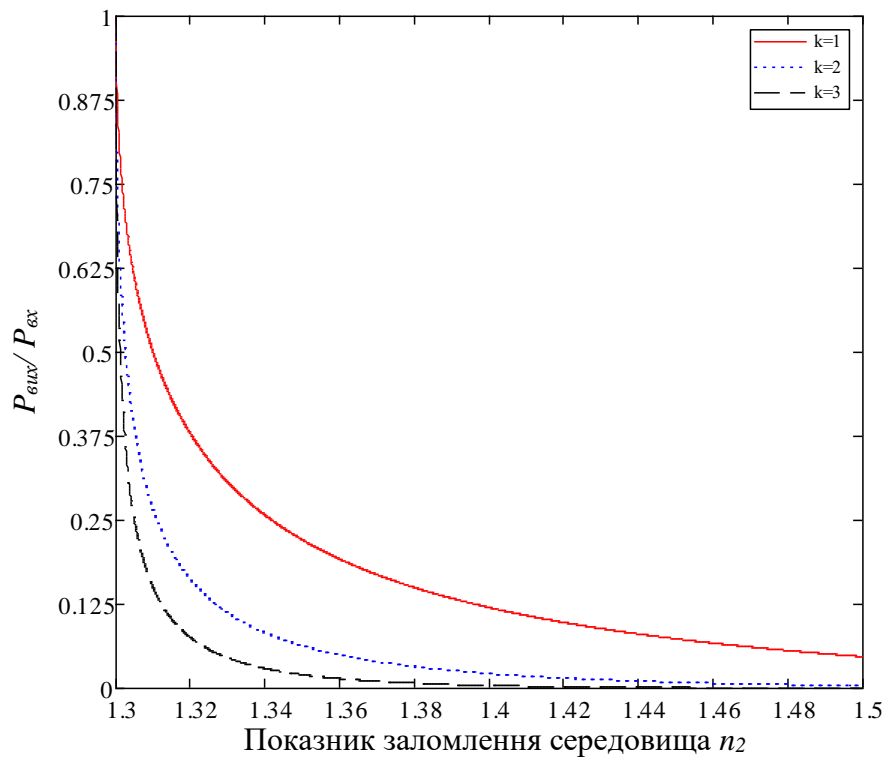


Рисунок 3.9 – Результати розрахунків залежності $\frac{dP_{\text{вух}}}{dP_{\text{вх}}}$ від n_2 , $n_1=1,9$ при $k=1,2,3$

Як видно з графіків у випадку навіть трьох відбиттів променя від модулюючої границі при максимальному значенні n_2 вихідна потужність $P_{вих}$ для будь якої поляризації практично дорівнює нулю. У випадку багаторазового відбиття дозволяє отримати максимальну глибину модуляції, а відповідно і максимальну чутливість сенсора до незначної зміни показника заломлення зовнішнього середовища.

Максимальне значення n_{2max} буде визначатися значенням мінімальної зміни показника зовнішнього середовища $\Delta n_{min.}$, що реєструється оптичною схемою.

Ширина світловода обирається виходячи з конструктивних міркувань і того, що ширина світлодіодної структури повинна бути значно більшої довжини хвилі випромінювання. З практичної точки зору, ширину світловода робити більше 2,5 мм недоцільно, оскільки це призводить до значного збільшення довжини світловода, що буде негативно відобразитися на параметрах сенсора.

3.6 Розрахунок параметрів сенсора

Коефіцієнт модуляції сенсора для вимірювання коефіцієнта вимірювання показника заломлення суттєво залежить від діаграми спрямованості джерела випромінювання і взаємного розташування відносно світловодної структури.

В роботі був проведений розрахунок коефіцієнту модуляції сенсору для отримання даних, щодо оптимального взаємного розташування джерела випромінювання і світловодної структури. Розрахунки проводилися на прикладі спиртового розчину.

Згідно з [22] коефіцієнт заломлення розчину етилового спирту є функцією концентрації. Значення показника заломлення рідини при 20 ° С від концентрації етилового спирту у розчині наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Залежність коефіцієнту заломлення водного розчину від концентрації етилового спирту

C(%)	n	C(%)	n	C(%)	n
0	1,3330	60,45	1,3633	83,55	1,3648
7,61	1,3379	66,44	1,3641	92,68	1,3637
15,55	1,3436	71,23	1,3646	96,33	1,3623
24,42	1,3491	77,35	1,3647	–	–
41,51	1,3585	82,86	1,3649	–	–

(C (%) – ваговий відсоток етилового спирту у розчині)

За допомогою математичного пакета MathCad14 по алгоритмам (3.1 – 3.22) була розроблена програма розрахунку коефіцієнту модуляції m при проходженні променя світловодною структурою, при вимірюванні спиртового розчину. Врахуючи наведені в залежності (3.2 – 3.22) були встановлені такі вхідні дані для розрахунку датчика :

– $n_{2\nu}$ – показник заломлення водної середи з розчину етилу для ($C = \%$);

– $n_{20} = 1,333$ – показник заломлення водного розчину для ($C = 0 \%$) ;

– $n_{2\nu}(\nu) = n_{20} + \Delta_n \nu$; $\Delta_n = 0,0001$; $\nu = 0 \dots 320$;

– показник заломлення світловода;

– $\kappa = 1 - 3$ – кількість відбиттів;

– $\theta_{1kp}(\nu, n_1) = a \sin\left(\frac{n_{2\nu}(\nu)}{n_1}\right) \frac{\text{deg}}{\text{deg}}$ – критичний кут, що відповідає показнику

заломлення $n_{2\nu}(\nu)$;

– $\alpha_0 = 10\text{deg}, 11\text{deg}, 80\text{deg}$ – кут призми введення;

– $\phi_{\max} = 10\text{deg}, 15\text{deg}..20\text{deg}$ – максимальний кут діаграми спрямованості

джерела; $\theta_{1\max}(\alpha_0, \phi_{\max}, n_1) = \left[\left(\alpha_0 \pm a \sin\left(\frac{\sin(\phi_{\max})}{n_1}\right) \right) \right] \frac{\text{deg}}{\text{deg}}$.

Враховувалась рівномірна інтенсивність випромінювання в межах діаграми спрямованості джерела оптичного випромінювання. Відносна потужність випромінювання дорівнює $P_0 = 1$.

У нашому випадку основним параметром для розрахунку є коефіцієнт модуляції m , який характеризує рівень зміни вихідної потужності від показника

заломлення етилового розчину n_{2V} з концентрацією C . Даний параметр $m(\alpha_0, \nu, \phi_{\max}, n_1, k)$ залежить також від: кута у підставі призми введення α_0 , n_{2V} показника заломлення рідини; максимального кута діаграми спрямованості ϕ_{\max} ; а також кількості відбиттів променя k .

Було проаналізовано вплив кута при основі призми введення α_0 на коефіцієнт модуляції m для різних значень максимального кута діаграми спрямованості ϕ_{\max} , а також трьох значень концентрацій $C_1 = 15,55\%$, $C_2 = 41,51\%$ і $C_3 = 82,86\%$. Типові значення ϕ_{\max} діаграми спрямованості для стандартних світлодіодів лежать в діапазоні $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$. Результати розрахунків $m(\alpha_0)$ для трьох значень концентрацій: $C_1 = 15,55\%$, $C_2 = 41,51\%$ і $C_3 = 82,86\%$ наведені на рисунках (3.10 – 3.19).

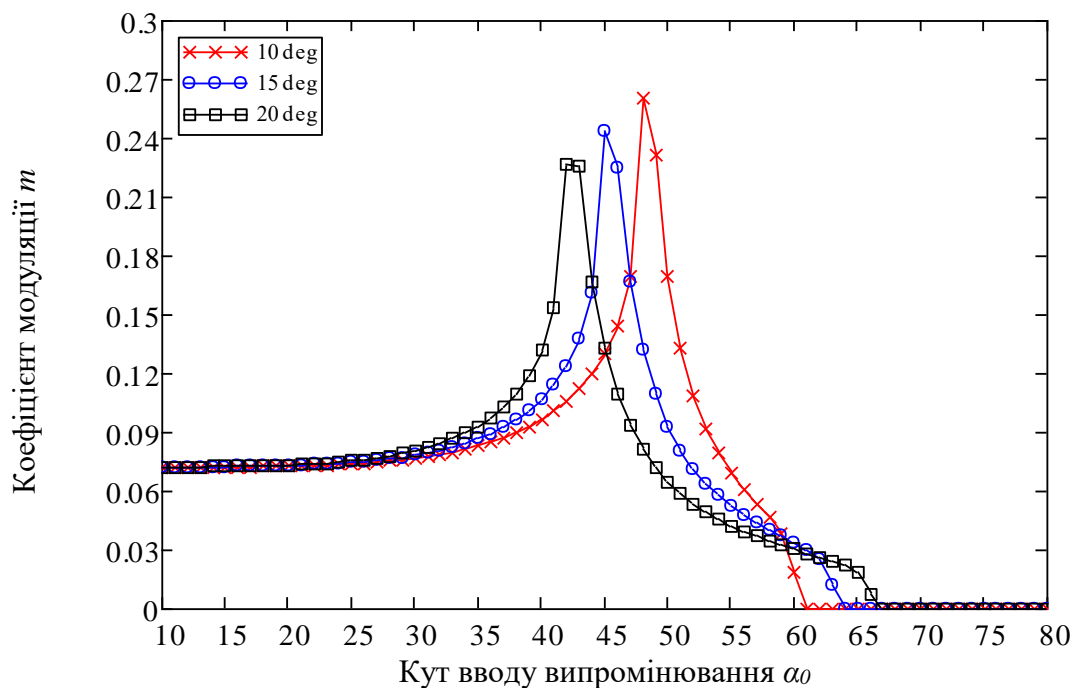


Рисунок 3.10 – Результати обчислення m для концентрації етилового спирту 15,55 %, кількість відбиттів $k=1$

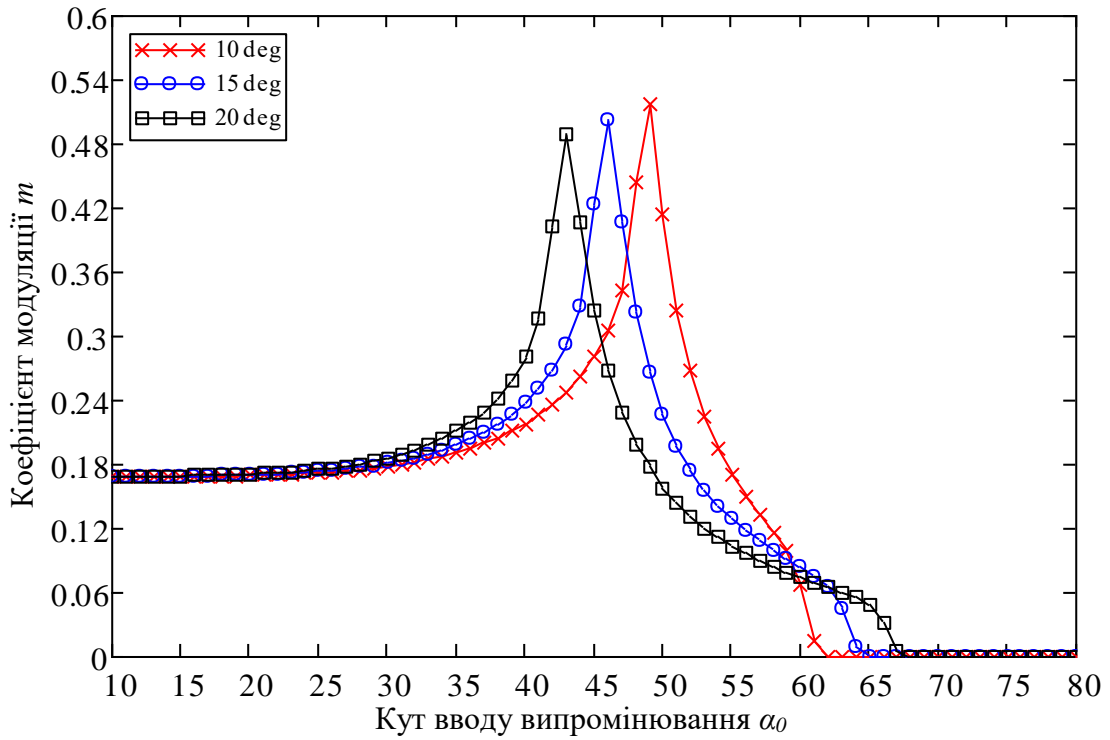


Рисунок 3.11 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту 41,51% кількість відбиттів $k=1$

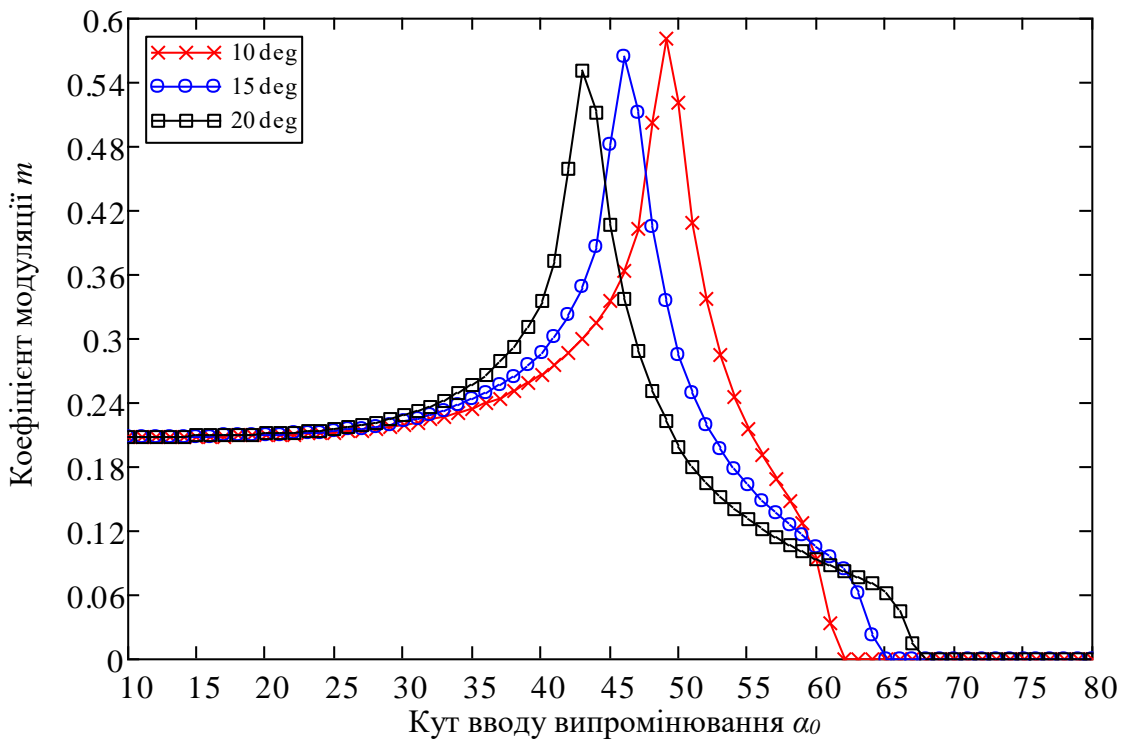


Рисунок 3.12 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту 82,86 % кількість відбиттів $k = 1$

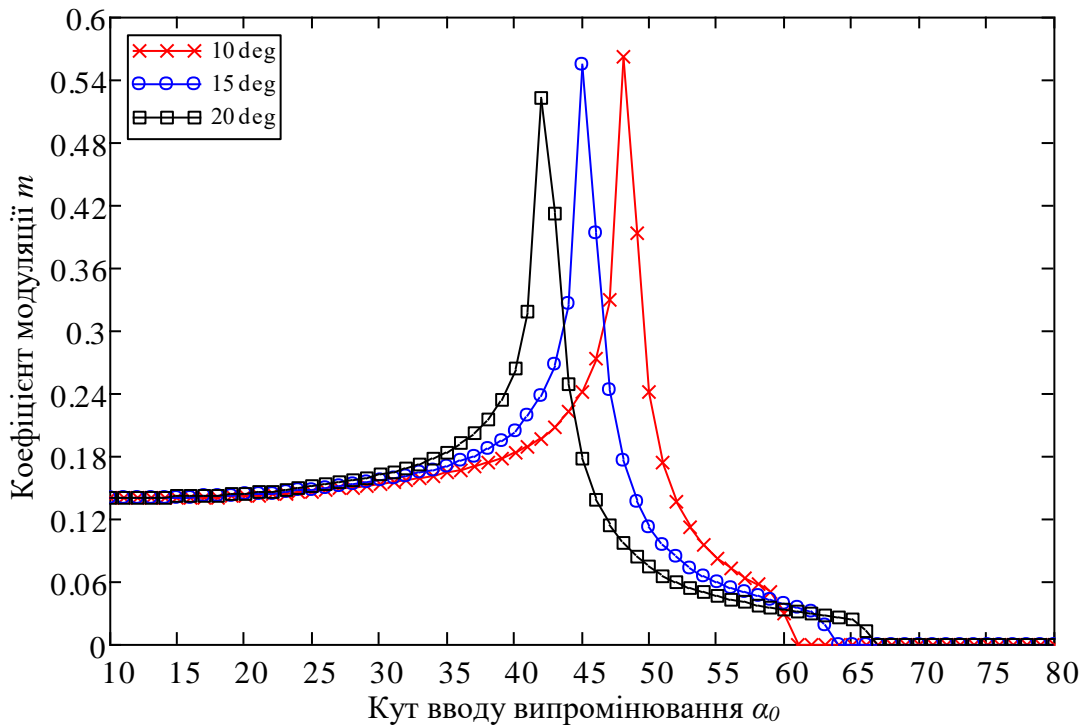


Рисунок 3.13 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту
15,55% кількість відбиттів $k=2$

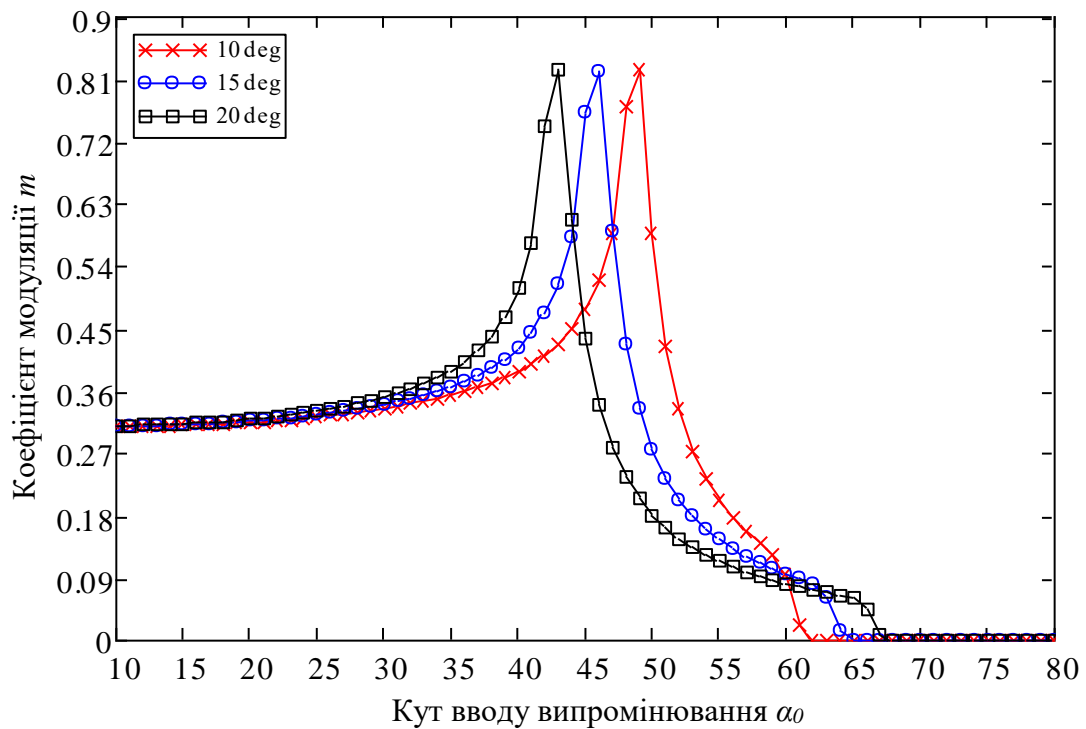


Рисунок 3.14 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту
41,51% кількість відбиттів $k=2$

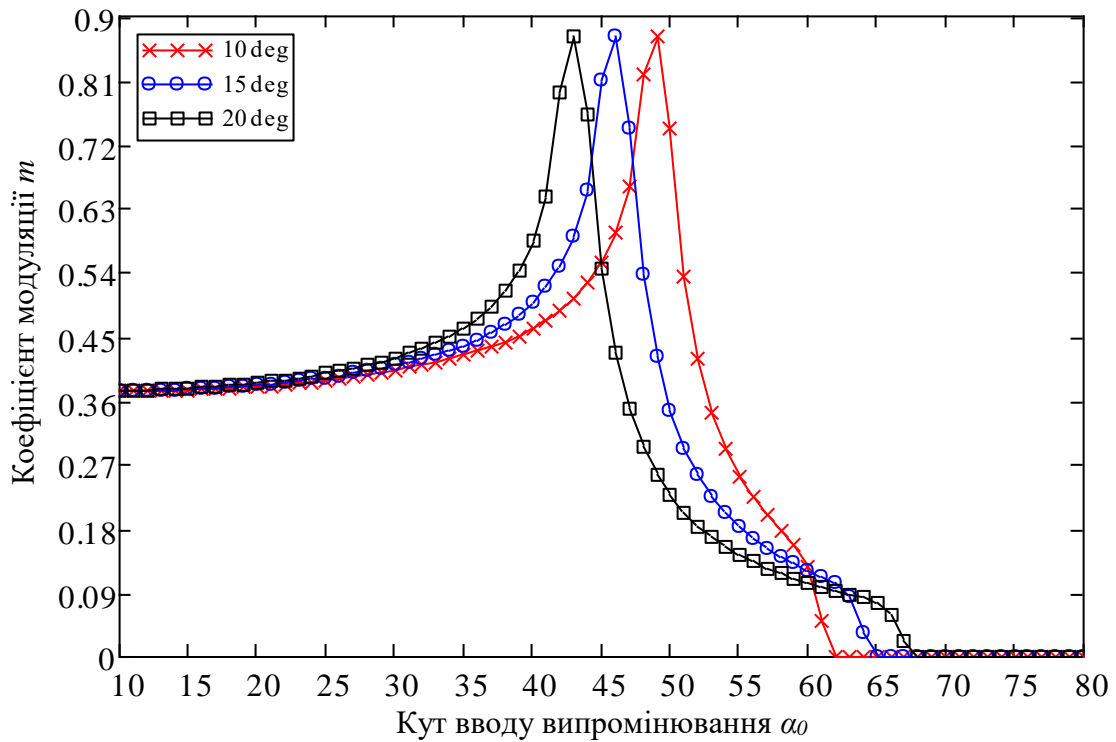


Рисунок 3.15 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту 82,86% кількість відбиттів $k=2$

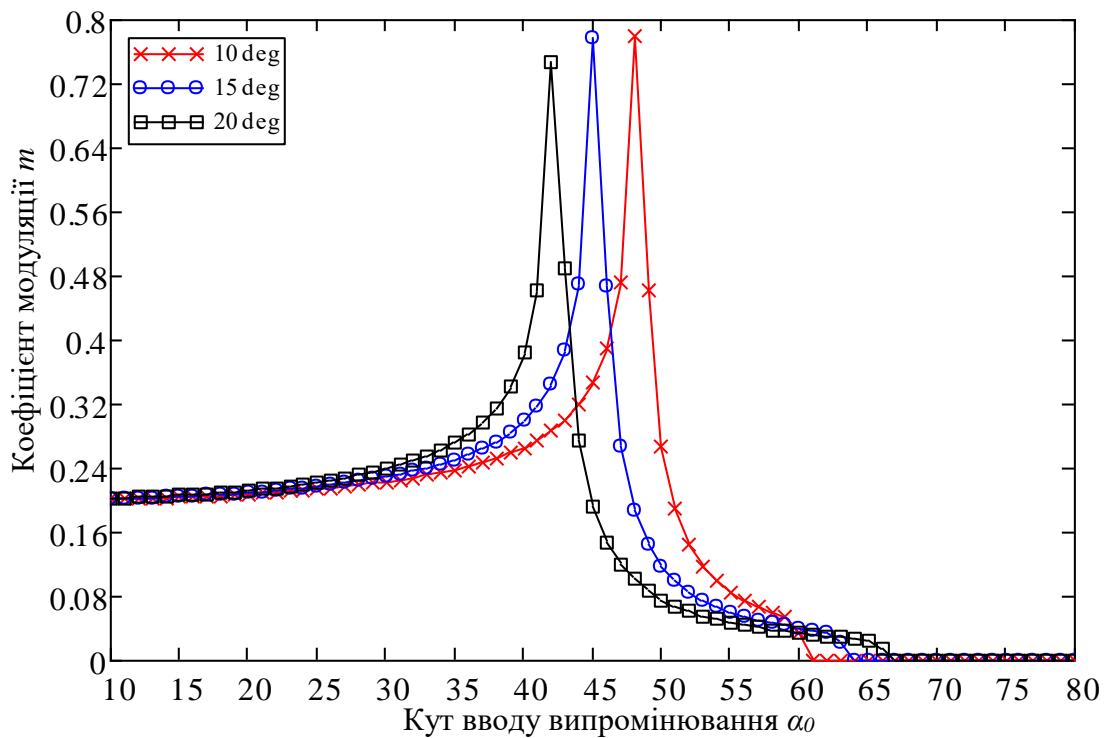


Рисунок 3.16 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту 15, 55% кількість відбиттів $k=3$

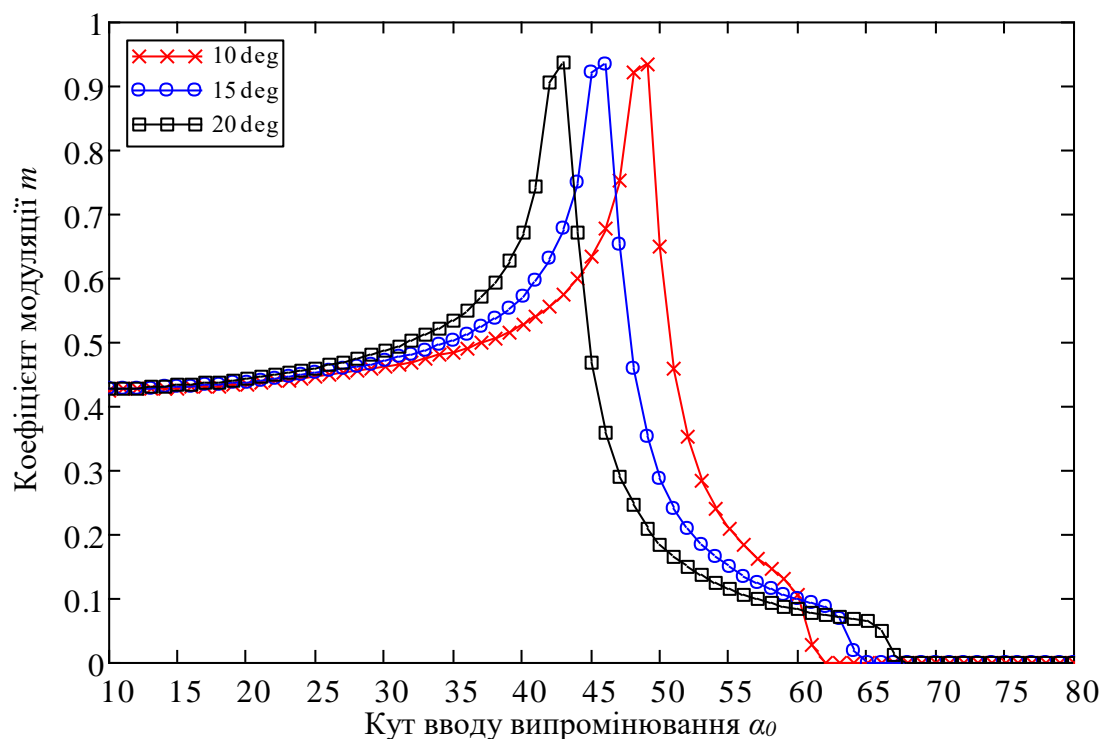


Рисунок 3.17 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту
41,51% кількість відбиттів $k=3$

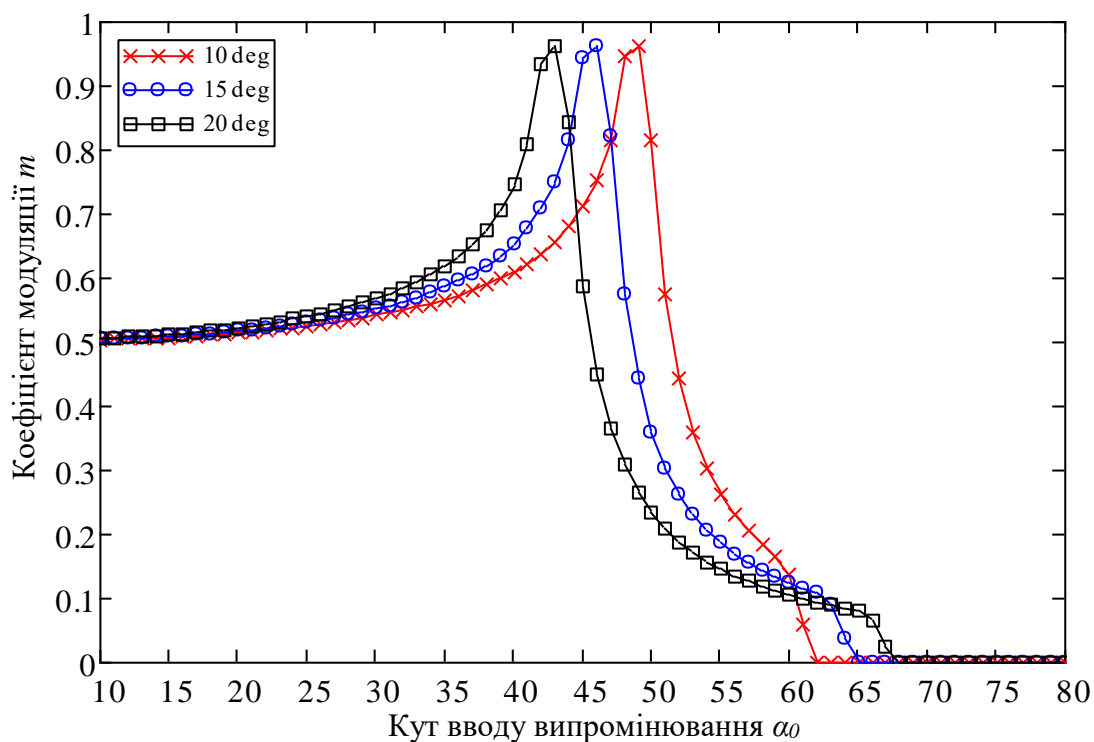


Рисунок 3.18 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту
82,86% кількість відбиттів $k=3$

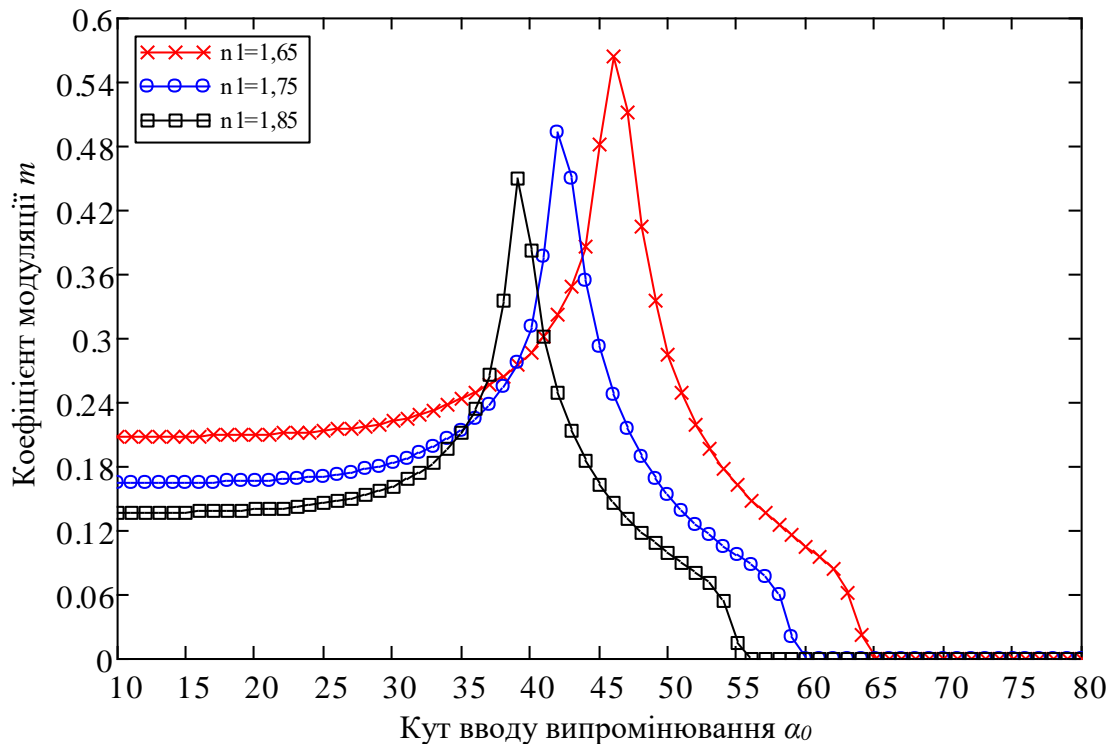


Рисунок 3.19 – Результати обрахунку m для концентрації етилового спирту 41,25% кількість відбиттів $k = 1$ при змінному показнику n_1

Як видно з розрахунків, представлених на рисунках залежності коефіцієнта носять резонансний характер при незначних змінах коефіцієнта заломлення рідини. При більш значних змінах коефіцієнта заломлення слід очікувати менш виражені резонанси, а саме постійний високий коефіцієнт модуляції при малих кутах у основі призми $\alpha_0 < 35^\circ$.

Математичне моделювання роботи датчика для оцінки концентрації етилового спирту у розчині води носить яскраво виражений резонансний характер коефіцієнту модуляції у всьому діапазоні вимірювань $C = 15,55\% - 82,86\%$. Слід відзначити, що при використанні світловодної структури з показником заломлення $n_1 = 1,65$ коефіцієнт модуляції майже не залежить від діаграми спрямованості джерела випромінювання при кутах $\alpha_0 < 35^\circ$ введення випромінювання. Сильний вплив на коефіцієнт модуляції спостерігається при кутах вводу в призму $\alpha_0 = 35^\circ - 65^\circ$. Крім того суттєвий вплив на коефіцієнт модуляції m дає зміна кута діаграми спрямованості джерела, яке залежно від

концентрації етилового спирту в діапазоні діаграм спрямованості $\varphi = 10..20^\circ$ може перевищувати $\Delta m > 0,5$. Виходячи з цього, принциповою задачею є визначення оптимальних кутів при основі призми введення для забезпечення прийняттого показника глибини модуляції. Загалом, оптимальними кутами введення є діапазон $\alpha_0 = 40^\circ..50^\circ$. Були також визначенні кути при основі призми, що при заданих діаграмах спрямованості джерела дають максимальну глибину модуляції $\varphi = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ становлять $\alpha_0 = 42^\circ, 46^\circ, 48^\circ$ відповідно.

Суттєвий вплив на глибину модуляції становить кількість відбиттів при проходженні випромінювання крізь світловодну структуру. Розрахунки показують, що навіть при незначних змінах коефіцієнту заломлення n_2 (малих концентраціях етилового спирту) коефіцієнт модуляції наближається до 1 вже при трьох відбиттях, тому збільшувати цей показник практично недоцільно.

Іншим фактором, що суттєво впливає на коефіцієнт модуляції є показник заломлення n_1 світловодної структури. Результати розрахунків показують, що збільшення цього параметра дозволяє суттєво збільшити коефіцієнт модуляції при малих кутах введення випромінювання при основі призми, хоча збільшення абсолютних значень коефіцієнта модуляції спостерігається при зменшенні показника заломлення.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проведено аналітичний огляд волоконно-оптичних сенсорів, включно з класифікацією і принципом роботи.

Детально розглянуто фізичні принципи роботи сенсорів, що базуються на порушенні ефекту повного внутрішнього відбиття. Проведено аналіз типів сенсорів фізичних величин на основі керованих світловодних структур.

Проаналізовано математичну модель сенсора на основі повного внутрішнього відбиття для вимірювання показника заломлення рідини, отримано аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнтів модуляції датчика. Проведено математичне моделювання сенсора на прикладі вимірювання вмісту етилового спирту у розчині.

Проаналізовано вплив кута при основі призми введення на коефіцієнт модуляції m для різних значень максимального кута діаграми спрямованості джерела. Показано, що:

Наявний яскраво виражений резонансний характер коефіцієнту модуляції у всьому діапазоні вимірювань $C = 15,55 \% - 82,86 \%$. При $n_1=1,65$ коефіцієнт модуляції майже не залежить від діаграми спрямованості джерела випромінювання при кутах введення випромінювання $\alpha_0 < 35^\circ$. Сильний вплив на коефіцієнт модуляції спостерігається при кутах вводу в призму $\alpha_0 = 35^\circ - 65^\circ$. Максимальна глибина модуляції для діаграми спрямованості $\varphi = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ спостерігається при кутах введення випромінювання $\alpha_0 = 42^\circ, 46^\circ, 48^\circ$.

Показано, що чутливість датчика може бути підвищена за рахунок збільшення його довжини (кількості відбиттів на границі світловод/середя κ). Однак в цьому випадку коефіцієнт модуляції швидко наближається до 1, що призводить до необхідності працювати з низькими рівнями оптичного сигналу.

Показано, що збільшення показника заломлення світловода n_1 світловодної структури дозволяє суттєво збільшити коефіцієнт модуляції при малих кутах введення випромінювання при основі призми, хоча збільшення абсолютних значень коефіцієнта модуляції спостерігається при зменшенні показника заломлення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Senior J. Optical Fiber Communications: Principles and Practice 3rd Edition. Pearson, 2008. 1128 p.
2. Fraden J. Sensors. Springer Cham, 2015. 758 p.
3. Francis T.S. Yu, Shizhuo Y. Fiber Optic Sensors. Marcel Dekker N.Y., 2002. 495 p.
4. Jenkins A.F., White H.E. Optics. McGraw–Hill , 2001. 766 p.
5. Rajan G. Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications. CRC Press, 2020. 575 p.
6. Yao S.K. Fiber Optical Intensity Sensors // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1983. Vol. SAC-1, № 3. P. 562–575.
7. Fly-by-light. Proceedings of Spie--The International Society for Optical Engineering. Vol. 2295 CA. SPIE: San Diego/ SPIE Press, 2006. 256 p.
8. Fritsch K., Beheim G. Wavelength-division multiplexed digital optical position transducer // Opt. Lett. 1986. Vol. 11. P. 1–3.
9. Murakami Y., Sudo S. Coupling characteristics measurements between curved waveguides using a two-core fiber coupler // Appl. Opt. 1981. Vol. 20. P. 417–422.
10. Spillman W. B., Gravel R. L. Moving fiber-optic hydrophone // Opt. Lett. 1980. Vol. 5, P. 30-31.
11. Kersey A., Davis M.A., Heather P. Leblanc H. Fiber Grating Sensors // Journal of Lightwave Technology. 1997. Vol 15. P 1442–1463.
12. Jackson D., Ribeiro L. A., Reekie L., Archambault, J. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network // Optics Letters. 1993. Vol. 18. P. 1192–1194.
13. Kukhtin S.M., Hnatenko O.S. Temperature Sensor Using Bragg Structure. // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2023. Vol. 15, No 5. P. 05027-1–05027-5.
14. Kukhtin S., Hnatenko O. Temperature measurements using Bragg sensor. 12th International Symposium «Optics & its applications» (OPTICS-12) OPTICS-12, 15–19 October, 2024, Armenia. P. 120

15. LeFevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. 3rd Edition. Applied Photonics Library. Artech House, 2022. 508 p.
16. Michal R. J, Udd E., Theriault J.P. Derivative fiber-optic sensors based on phase-nulling optical gyro development // Proc SPIE. 1986. No 719. P. 150–154.
17. Udd E., Michal R. J., Theriault J. P., Cahill R. F. High Accuracy Light Source Wavelength and Optical Fiber Dispersion Measurements Using the Sagnac Interferometer. *Proceedings of the 7th Optical Fiber Sensors Conference // IREE Sydney. Australia. 1990. 329 p.*
18. Fiber optic sensors based on the Mach-Zehnder and Michelson interferometers, in *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists* /edited by Udd. E. New York: Wiley. 1991. 469 p.
19. Schubert E.F. Light-emitting diodes. Cambridge University Press, 2006. 434 p.
20. Черняков Е.І., Кухтін С.М. Збірник задач з розв'язанням з дисципліни «Оптоелектроніка» та «Фізика твердого тіла»: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2019. 208 с.
21. Udd. E., Spillman W.B. *Fiber Optic Sensors: an Introduction for Engineers and Scientists*. Wiley Telecom. 2011. 512 p.
22. Novakowska J. The refractive indices of ethyl alcohol and water mixtures: Master of science thesis. Chicago, 1939. 52 p.