

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Інфокомунікацій _____
(повна назва)

Кафедра _____ Інформаційно-вимірювальних технологій _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Розробка волоконно-оптичного
датчика тиску

Виконала:

студентка 2 курсу, групи ЗЯ_М-22-1

Гордієнко І.Ю.

(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Забезпечення якості

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Козлов Ю.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Захаров І.П.

(прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Інфокомунікацій _____

Кафедра _____ Інформаційно-вимірювальних технологій _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

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

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

Освітня програма _____ Забезпечення якості _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентки _____ Гордієнко Ірини Юріївни _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розробка волоконно – оптичного датчика тиску _____

затверджена наказом університету від 03.11.2023 р. № 1294Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.01. 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1. Огляд аналогів

4.2. Аналіз технічного завдання

4.3 Розрахунок показників мембрани

4.4 Розрахунок міцності і моделювання мембрани на прогин

4.5 Розрахунок деформації оптичного волокна

4.6 Дослідження зміни довжини хвилі

4.7 Конструкція та принцип дії волоконно-оптичного датчика

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	доц. Козлов Ю.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми та методів її вирішення	15.11.2023	
2	Підготовка довідкових матеріалів та даних для розробки основної частини	19.11.2023	
3	Розробка основної частини	03.12.2023	
6	Написання пояснювальної записки	06.12.2023	
7	Підготовка презентації	09.12.2023	
8	Представлення закінченої дипломої роботи на кафедрі	15.12.2023	

Дата видачі завдання _____ 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Козлов Ю.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи містить 81 сторінок, 41 рисунок, 1 таблицю, перелік посилань з 38 назв.

Об'єкт дослідження – волоконно – оптичний датчик тиску.

Метою кваліфікаційної роботи є закріплення знань, що стосуються основних фізичних процесів, будови волоконно – оптичних датчиків тиску, принципу їх дії, основних параметрів і характеристик, надбання практичних навичок самостійного розрахунку реальних характеристик і освоєння методів їх проектування (у тому числі, автоматизованого).

Після аналізу існуючих технічних рішень конструкції волоконно-оптичного датчика тиску запропоновано конструктивні зміни характеристик датчика, таких як поява мембрани, для підвищення точності та чутливості вимірювань.

У випускній кваліфікаційній роботі було здійснено розрахунок мембрани, виходячи з технічних вимог, та оптимізовано конструкцію датчика. Проведено розрахунки міцності мембрани, а також внаслідок цього вивчено деформацію оптоволокна і решіток Брегга. Розроблено 3D-модель датчика тиску.

Методи дослідження – аналітичні та чисельні за допомогою системи комп'ютерної математики MathCad и Solid Works.

Пояснювальна записка оформлена у текстовому редакторі MS Office Word

**ДАТЧИК, РЕШІТКА БРЕГГА, СПЕКТР, ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ
ДАТЧИК ТИСКУ, МЕМБРАНА**

ABSTRACT

The explanatory note to the master's qualification thesis contains 81 pages, 41 figures, 1 table, a list of references from 38 titles.

The object of research is a fiber optic pressure sensor.

The purpose of the qualification work is to consolidate knowledge related to the main physical processes, the structure of fiber-optic pressure sensors, the principle of their operation, basic parameters and characteristics, to acquire practical skills for independent calculation of real characteristics and mastering methods of their design (including automated).

After the analysis of the existing technical solutions of the design of the fiber-optic pressure sensor, structural changes of the sensor characteristics, such as the appearance of a membrane, are proposed to increase the accuracy and sensitivity of the measurements.

In the final qualification work, the calculation of the membrane was carried out based on the technical requirements, and the design of the sensor was optimized. Calculations of the strength of the membrane were carried out, and as a result, the deformation of the optical fiber and Bragg gratings was studied. A 3D model of the pressure sensor was developed.

The research methods are analytical and numerical using MathCad and Solid Works computer mathematics systems.

The explanatory note is prepared in the text editor MS Office Word.

**SENSOR, BRAGG GRIT, SPECTRUM, FIBER OPTIC PRESSURE SENSOR,
MEMBRANE**

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	8
Вступ.....	9
1. Загальні відомості про датчики.....	11
1.1 Типи оптичних волокон.....	14
1.2 Принцип роботи оптичного волокна.....	14
1.3 Висновок до розділу 1.....	19
2. Волоконно – оптичні датчики тиску.....	21
2.1 Принцип роботи волоконно – оптичних датчиків.....	21
2.2 Класифікація волоконно – оптичних датчиків тиску.....	28
2.3 Область застосування та переваги волоконно-оптичних датчиків тиску	29
2.4 Принцип роботи волоконної ґратки Бреґґа.....	32
2.5 Волоконна бреґґівська ґратка як чутливий елемент.....	34
2.6 Волоконно-оптичні датчики на ґратах Бреґґа.....	35
2.7 Фотоелектричні датчики тиску.....	41
2.8 Висновки до розділу 2.....	49
3. Розрахунок та моделювання параметрів мембрани волоконно – оптичного датчику тиску.....	50
3.1 Розрахунок мембрани.....	50
3.2 Моделювання прогинів мембрани.....	53
3.3 Розрахунок параметрів оптичного волокна.....	58
3.4 Моделювання мембрани з жорсткозакріпленим оптичним волокном.....	63
3.5 Моделювання деформації оптичного волокна.....	67
3.6 Висновки до розділу 3.....	70
4. Розробка конструкції волоконно – оптичного датчика тиску.....	71
4.1 Конструкція волоконно – оптичного датчика тиску.....	71

4.2	Конструкція мембрани.....	72
4.3	Висновок до розділу 4.....	74
	Висновки.....	75
	Список використаних джерел.....	77

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВОД – волоконно-оптичний датчик, (optical fiber sensor) – це оптоволоконні пристрої для детектування деяких величин, які використовують основним елементом оптичне волокно як в якості лінії передачі даних, так і в якості чутливого елемента;

ДС – джерело світла;

ОВ – оптичне волокно, – нитка з оптично прозорого матеріалу, за звичай скло та пластик, яка використовується для перенесення світла усередині себе за допомогою повного внутрішнього відображення;

БВ – багатомодові волокна;

ОДВ – одномодові волокна;

СД – світлодіод;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВБГ – волоконна бреггівська ґратка;

ПЗ – показник заломлення;

NA – Numerical Aperture;

WDM – Wavelength Division Multiplexing;

TDM – Time Division Multiplexing;

ПЗЗ – прилад із зарядним зв'язком;

ЗП – запам'ятовуючий пристрій;

ВСТУП

За останнє десятиліття спостерігається стрімкий розвиток промислової інфраструктури, у зв'язку з чим все частіше виникають завдання діагностики та контролю працездатності інженерних конструкцій, деталей машин та інших складних технічних об'єктів. Своєчасне виявлення досягнення зазначеними параметрами критичних значень дозволяє запобігти виникненню можливих аварійних ситуацій

Одним із найважливіших напрямів у розвитку техніки на даний момент є сенсорика. Без достовірних даних про фізичні параметри матеріалів та елементів конструкцій неможливе правильне функціонування будь-якої мало значущої складної технічної системи. Звичайно, значна кількість датчиків фізичних величин давно створена та успішно використовуються. Але завдання, як і раніше, залишається актуальним для вдосконалення конструкції волоконно-оптичних датчиків, збільшення їх чутливості та надійності, розширення діапазону вимірювань вже існуючих пристроїв, пошуку нових фізичних принципів, які використовуються при побудові цих датчиків.

Термін ВОД з'явився на початку 80-их років 20-го століття, сформувавши цей тип датчиків як один із напрямків технологічного поля. Створення датчиків на основі оптичних волокон почалось ще до середини 70-х років 20-го століття, а публікації з розробками та експериментальними зразками з'являлись у другій половині 70-их років 20-го століття. Основними елементами волоконно-оптичного датчика є оптичне волокно, світловипромінюючі (ДС) і світлоприймаючі пристрої, оптичний чутливий елемент. І тому вони не випромінюють і не проводять електричний струм та не схильні до електромагнітних перешкод.

Якщо класифікувати волоконно-оптичні датчики за застосуванням в них оптичного волокна, то їх можна розподілити на датчики, в яких оптичне волокно використовується як лінія передачі, і датчики, в яких воно використовується чутливим елементом. У датчиках типу «лінії передачі» використовуються

найчастіше багатомодові оптичні волокна, а в датчиках сенсорного типу зазвичай - одномодові.

У зв'язку з цим перспективними є розробка та проектування волоконно-оптичних датчиків різних фізичних параметрів. Насамперед це пов'язано з появою високоякісного та доступного (у тому числі і за ціною) оптичного волокна, а також за рахунок зниження вартості оптоелектронних компонентів, які спочатку були розроблені для використання в системах оптичного зв'язку. Крім того, волоконно-оптичні датчики мають значні переваги в порівнянні з іншими видами датчиків.

Волоконно-оптичні датчики особливо перспективні і навіть необхідні в специфічних умовах експлуатації, таких як перебування в сильному електромагнітному полі або вибухонебезпечних зонах. За допомогою волоконно-оптичних датчиків можна виміряти практично всі фізичні величини: температура, відстань, тиск, вібрації, деформація, магнітне поле, а також звукові коливання і таке інше.

Завдання випускної кваліфікаційної роботи:

- 1) Огляд аналогів.
- 2) Аналіз технічного завдання.
- 3) Розрахунок показників мембрани.
- 4) Розрахунок міцності і моделювання мембрани на прогин.
- 5) Розрахунок деформації оптичного волокна.
- 6) Дослідження зміни довжини хвилі.
- 7) Конструкція та принцип дії волоконно-оптичного датчика

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДАТЧИКИ

Датчик – це вимірювальний пристрій у вигляді конструктивної сукупності одного або декількох вимірювальних перетворювачів величини, що вимірюється і контролюється, та котрий виробляє вихідний сигнал, зручний для дистанційного передавання, зберігання та використання у системах керування і має нормовані метрологічні характеристики.

Це елементи які сприймають вхідний сигнал (вхідну величину, яка контролюється наприклад тиск, температура, струм, напруга та тощо) і перетворюють його в величину зручну для передачі, зберігання, використання у системі керування.

Датчик обов'язково містить у своїй конструкції чутливий елемент і часто – перетворювальну частину. Головними ж характеристиками електронних датчиків є їх чутливість і похибка вимірювання.

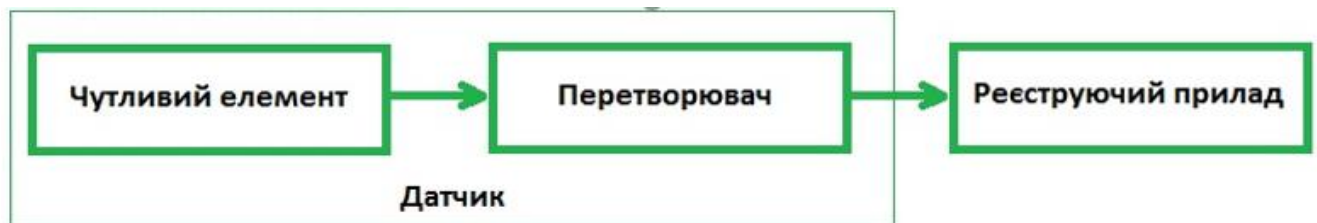


Рисунок 1.1 – Структурна схема датчика

Класифікація датчиків тиску за принципом дії

Датчики можна класифікувати за багатьма параметрами, але головні з них показані нижче.

За принципом дії:

- Волоконно-оптичні
- Оптичні (фотодатчики)
- Магнітоелектричний датчик (на основі ефекту Холла)

- П'єзоелектричний датчик
- Тензоперетворювач
- Ємнісний датчик
- Потенціометричний датчик
- Індуктивний датчик

Класифікація за методом вимірювання (виду вхідних величин):

Активні

Електричні датчики, які перетворюють неелектричні вхідні величини в електричний сигнал, називають генераторними (активними) датчиками. Не потребують зовнішнього джерела живлення. До них відносять: термоелектричні (термопари), індукційні, п'єзоелектричні, вентильні, фотоелементи.

Пасивні

Це такі датчики, у яких зміна вхідної величини датчика викликає зміна будь – якого параметра самого датчика (До них відносяться: контактні, реостатні, тензодатчики, потенціометричні, терморезистори, ємнісні, індуктивні. Параметричні датчики отримують енергію від допоміжного джерела живлення.

Класифікація за видом вхідного сигналу (фізичної величини, що вимірюється):

- Тиску: манометри, вакуумметри, мановакуумметри.
- Температури: манометричні термометри, термопари, термометри опору.

(Датчик температури)

- Рівня: поплавкові, кондуктометричні, ємнісні, радарні, ультразвукові.
- Витрат (витратомір): механічні лічильники витрат, перепадоміри, ультразвукові витратоміри, електромагнітні витратоміри, витратомір коріоліса, вихрові витратоміри.
- Концентрації. (датчик чадного газу)
- Радіоактивності: іонізаційна камера, датчик прямого заряду.

- Положення: кінцеві вимикачі.
- Кутового положення: сельсин.
- Вібрації
- Вологості.
- Фотодатчики (оптичні): інфрачервоний датчик руху, фотодіод.

За видом вихідного сигналу датчики бувають:

– аналогові

Виробляють аналоговий сигнал, пропорційно зміни вхідній величині. Згідно зі стандартами існує три діапазони струмових сигналів: 0 ... 5мА, 0 ... 20мА та 4 ... 20мА.

– дискретні

Виробляють дискретний сигнал послідовність імпульсів. Найпростіший датчик – звичайний механічний контакт: двері відкрили – контакт розімкнувся, закрили – замкнувся. Таким чином, датчики на основі контакту є дискретними або бінарними, мають два положення, замкнутий – розімкнути або 1 і 0.

– цифрові

Датчики, що генерують послідовність імпульсів або двійковий код;

На сьогоднішній день великою популярністю стало використання оптичного волокна.

Оптоволокно (оптичне волокно, скор. ОВ) — це технічний виріб, що конструктивно являє собою діелектричний хвилевід, вкритий захисною оболонкою. Призначення цього виробу — транспортування електромагнітного випромінення діелектричним середовищем від оптичного передавача до оптичного приймача. Оптичне волокно є частиною волоконно-оптичних ліній, в яких для передавання застосовуються вікна прозорості, розташовані в частині спектру ближнього інфрачервоного діапазону, 800...1675 нм.

1.1 Типи оптичних волокон

За кількістю мод, що розповсюджуються по ОВ, розрізняють одно- та багатомодові ОВ. Основні типи ОВ подано на рисунку 1.2.

Конструктивно ОВ складається з трьох частин:

- серцевини – центральної частини ОВ, максимальне значення показника заломлення в якій більше від показника заломлення в оболонці ОВ. Визначає разом з оболонкою структуру поля розповсюджуваного оптичного випромінювання;
- оболонки – частини волокна, що, як правило, має постійне значення показника заломлення по поперечному перерізу і визначає разом з серцевиною структуру поля розповсюджуваного оптичного випромінювання;
- захисного покриття – покриття, що наноситься на оболонку ОВ з метою його захисту від зовнішнього впливу. Зовнішнє покриття може мати декілька шарів, необхідну адгезію до матеріалу оболонки ОВ і виготовляється з пластикатів.

1.2 Принцип роботи оптичного волокна

Оптичний світловод — це циліндричний діелектричний хвилевід, що передає світло від одного до другого кінця усієї своєї довжини завдяки фізичному явищу повного внутрішнього відбиття. Світловод складається із серцевинного та оболонкового шару, які виготовленні із матеріалів, що забезпечують утримування світла всередині кабелю. Для забезпечення функціонування даної системи діелектриків, необхідно мати показник заломлення серцевини більший, ніж оболонки. А також, границя двох середовищ може бути обривчастою, як у волокон зі сходиноквим профілем серцевини, чи згладженою, як у волокон з градієнтним профілем серцевини.

Структура оптоволоконного кабелю дуже проста й схожа на структуру коаксіального електричного кабелю. Проте, замість мідної серцевини тут

використовується тонке скловолокно, а замість внутрішньої ізоляції — скляна або пластикова оболонка, що не дозволяє світлу виходити за межі збірки. У цьому випадку мова йде про режим так званого повного внутрішнього відбиття світла від границі двох речовин із різними показниками заломлення (у скляної оболонки показник заломлення значно нижче, ніж у центрального волокна).

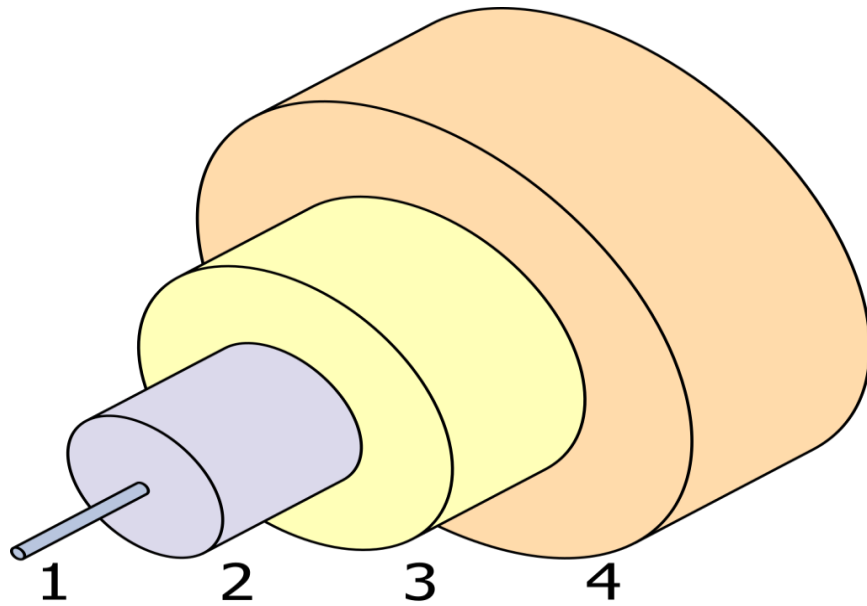


Рисунок 1.2 - Структура типового одномодового волокна, де 1 - серцевина 8 μm діаметр; 2 - оболонка 125 μm діаметр; 3 - буфер 250 μm діаметр; 4 - обшивка 400 μm діаметр

За кількістю розповсюджуваних мод розрізняють:

– одномодові ОВ – оптичні волокна, по яким в робочому діапазоні частот розповсюджується лише основна мода;

– багатомодові ОВ – оптичні волокна, по яким в робочому діапазоні частот розповсюджується більше однієї моди.

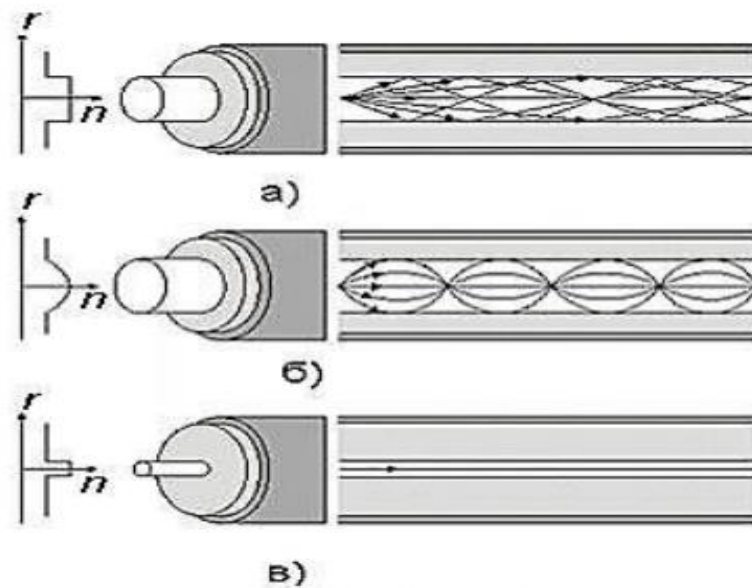


Рисунок 1.3 – Основні типи ОВ: а) багатомодове ступінчасте;
б) багатомодове градієнтне; в) одномодове

В одномодовому волокні поширюється одна мода, тобто один тип розподілу електромагнітного поля. Діаметр таких сердечників становить 5-10 мкм. Через невеликий діаметр відбувається утруднення введення променя, і з'єднань декількох волокон один з одним. Зазвичай використовують одномодове оптоволокно для створення довгих ліній зв'язку, тому що сигнал несе дуже незначні втрати на отриманій ділянці.

Найбільш розповсюджений тип одномодового волокна має діаметр сердцевини 8-10 мікрометрів та спроектований для використання світла близького до інфрачервоного діапазону спектру. Структура моди залежить від довжини хвилі світла, яке задіяне у процесі роботи, таким чином світловод фактично підтримує незначну кількість додаткових мод у видимій частині спектру світла. Багатомодове оптоволокно, для порівняння, виготовлено із діаметром центральної жили поперечного розміру щонайменше ніж 50 мікрометрів, та що найбільше сотні мікрометрів. Нормалізована частота V для волоска має бути не більше ніж нульовий член степеневого ряду функції Бесселя J_0 (приблизно 2.405).

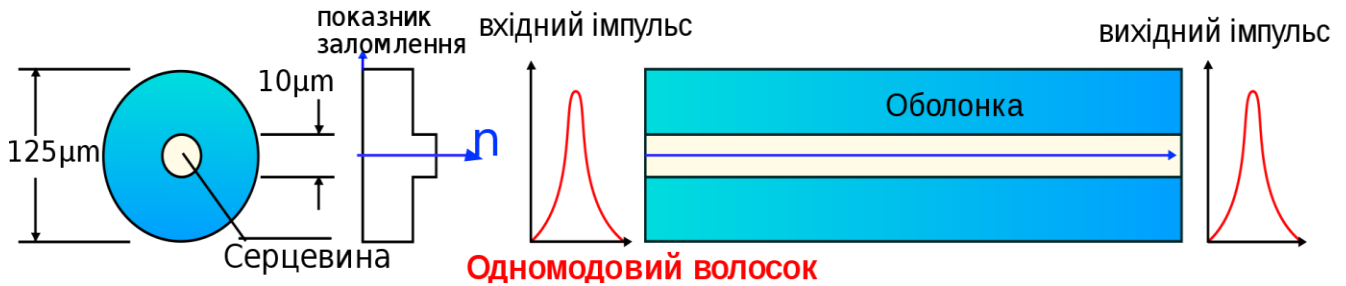


Рисунок 1.4 - Розповсюдження світлових променів через одномодові оптичні світловоди

Оптичне волокно із великим діаметром серцевини (більше 10 мікрон) може бути розраховане за допомогою методів геометричної оптики. Таке волокно називається багатомодовим. У свою чергу, у багатомодовому оптоволоконні поширюються сотні типів розподілу полів. Діаметр осердя 50, 62,5, 100 мкм

Сходинокве багатомодове волокно проводить промені світла вздовж серцевини завдяки ефекту повного внутрішнього відбиття. Промені, що падають на межу розділу компонентів волосини під стрімким кутом, більшим ніж кут повного внутрішнього відбиття, зазнають цілковитого відображення. Промені що стикаються із границею під малим кутом заломлюються у напрямку від серцевини до оболонки, а далі поглинаються і не передають інформацію. Значна цифрова апертура дає світлу пропагуватися вздовж волокна завдяки променям, що розташовані близько до осі, а також під різноманітними кутами, дозволяючи ефективно компонування пучка випромінення у світловоді. Проте попри все, ця цифрова апертура збільшує дисперсію, оскільки промені що подорожують під різними кутами проходять відрізки шляху різної довжини. Це, у кінцевому результаті, впливає на кількість часу необхідного для перетину загальної заданої довжини кабелю.

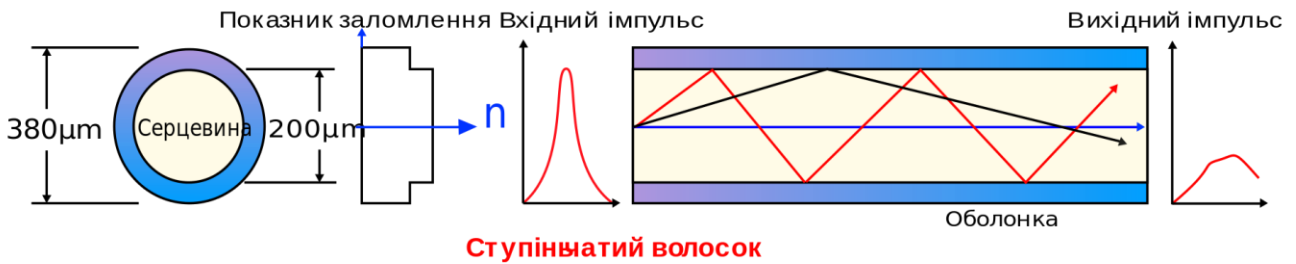


Рисунок 1.5 - Розповсюдження світлових променів через багатомодові оптичні світловоди

У градієнтному волокні показник заломлення у серцевині зменшується поступово від осі до зовнішньої стінки волокна. Це змушує промені світла вигинатися дугою при наближенні до оболонки, на відміну від несподіваного відображення на межі розділу компонентів волокна. Як наслідок, дугоподібний шлях просування зменшує багатовекторну дисперсію розповсюдження, тому що промені під значними кутами проходять через ділянку серцевини із малим показником заломлення швидше, ніж під великим. Профіль градієнту заломлення вибирається так, щоб мінімізувати різницю між продовжною швидкістю пропагації променів різної векторної направленості у волокні. Ідеальний профіль градієнту заломлення є дуже близький до параболічного при співвідношенні самої величини та відстані до осі.

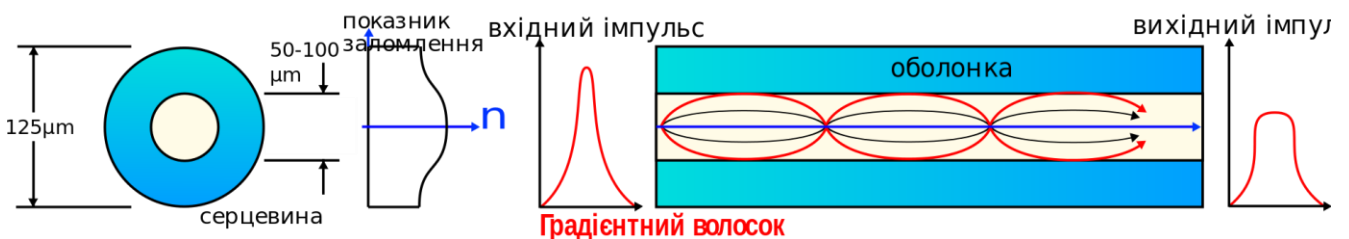


Рисунок 1.6 - Розповсюдження світлових променів через градієнтні оптичні світловоди

Діаметр сердечника багатомодового волокна відчутно більший, і це є плюсом при з'єднанні волокон. Мінус полягає у збільшенні дисперсії – оскільки вузький світловий імпульс розширюватиметься при подачі волокна. Через те, що шляхи, якими проходять промені, нерівні, виникає дисперсія, внаслідок чого енергія досягає кінця оптоволокна не одночасно (Рисунок 1.3).

Найчастіше для датчиків використовують багатомодові волокна.

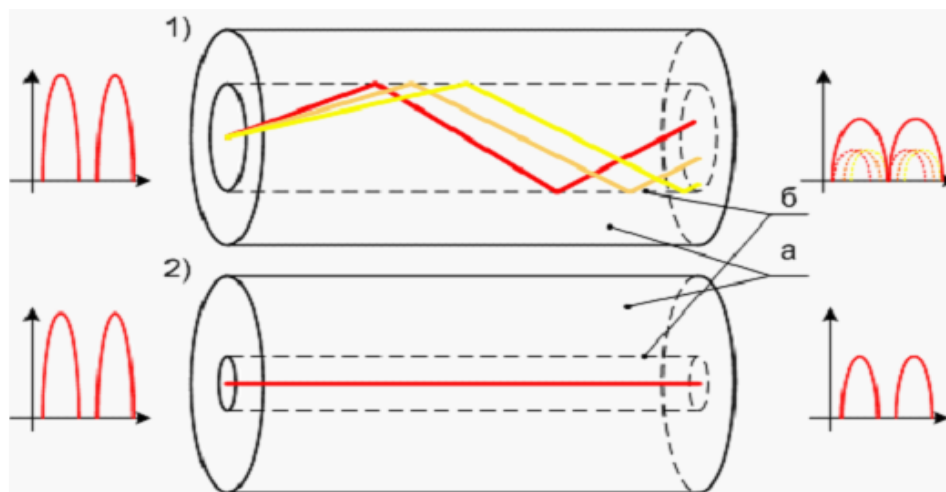


Рисунок 1.7 – Структура оптичних волокон та проходження сигналу у багатомодового оптичного волокна (1) та одномодового оптичного волокна (2)

1.3 Висновок до розділу 1

Підведемо підсумки першого розділу, при огляді літератури можна зробити висновок, що в даний час дослідження в області ВОД інтенсивно розвиваються. Найчастіше вибір ОВ не обмежується вибором ОДВ або БВ. Асортимент оптичних волокон досить різноманітний, і в залежності від досліджуваних об'єктів, найкраще рішення може виявитися використання конкретного типу волокна під необхідну ситуацію. ОВ можна назвати не лише найкращим фізичним середовищем для

передачі інформації, а й найбільш перспективним передавачем потоків великого обсягу інформації на значні відстані.

В данному розділі були розглянуті основні характеристики оптичних волокон та були проаналізовані класифікації ВОД. Для найбільш успішного використання датчикам бажано мати високі метрологічні характеристики, високу фундаментальність або надійну конструкцію, малу вагу, невеликий розмір і економне енергоспоживання, і одне з найголовніших – датчики повинні бути сумісні з мікроелектронними пристроями при низькій трудомісткості виготовлення і невеликій ціні.

Ці вимоги задовольняються волоконно-оптичними датчиками. При розгляді різних типів ВОД, в даній роботі був вибраний датчик на основі бреггівських ґрат, через унікальні характеристики даного типу датчиків.

2 ВОЛОКОННО – ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ТИСКУ

Волоконно-оптичний датчик - це датчик, який перетворює стан вимірюваного об'єкта в вимірюваний світловий сигнал.

Волоконно - оптичні датчики, це такі пристрої, в яких світло, що поширюється всередині оптичного волокна або зовнішнього первинного перетворювача, може змінюватися під впливом зовнішнього впливу.

2.1 Принцип роботи волоконно – оптичних датчиків

Принцип роботи оптичного волоконного датчика полягає в тому, щоб відправити світловий промінь інциденту з джерела світла в модулятор через оптичне волокно, і взаємодіяти з зовнішніми вимірними параметрами в модуляторі, щоб зробити оптичні властивості світла, такі як інтенсивність світла, довжина хвилі, частота, фаза, стан поляризації і т.д. Він змінюється і стає модульним оптичним сигналом, який потім відправляється на оптоелектронний пристрій через оптичне волокно, а вимірний параметр виходить після демодулятора. У всьому процесі світловий промінь вводиться через оптичне волокно, а потім випромінюється після проходження через модулятор.

Функція оптичного волокна спочатку передає світловий промінь, а по-друге, виступати в якості оптичного модулятора.

Основним елементом датчиків є оптичні волокна.

Волокно складається з оболонки та сердечника. По осердя йде поширення світла. Оболонка у свою чергу поміщається в спеціальне обплетення, яке збільшує міцність волокна, та захищає поверхню волокна від різних зовнішніх факторів. Світло у волокні відбивається повністю межі сердечника і оболонки оскільки є відмінність коефіцієнтів заломлення (n_2 і n_1) і потім лише поширюється по сердечнику (Рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 - Типова структура оптичного волокна та розподілу світла в ньому

Також необхідно, щоб дотримувалася умова, для повного внутрішнього відбиття світла, яке входить до оптоволокна під кутом:

$$0 \leq \theta \leq (\sin \sqrt{n_1^2 - n_2^2})^{-1} = \theta_{max}$$

З-за того, що різниця між коефіцієнтами заломлення світла в сердечнику мала, і знаходиться в межах 0,01, то:

$$\theta_{max} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

де θ_{max} – максимальний кут, при якому світло проходить по оптичному волокну.

Це максимальний можливий кут, під яким світло може проходити в оптичне волокно, тобто прийматися ним. Називається такий кут числовою апертурою позначається NA (Numerical Aperture).

При розгляді оптичних волокон замість різниці n_1 і n_2 частіше за використовується величина, що називається відносною різницею коефіцієнтів заломлення.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx n_1/n_2 - 1,$$

Якщо використовувати значення Δ , то залежність між NA та Δ може бути представлена наступним чином

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta},$$

Відносна різниця коефіцієнтів заломлення Δ зазвичай виражається у відсотках.

У середині волокна оптичні проміння розповсюджуються, багаторазово повністю відображаючись. Однак, розповсюдження відбувається у тому випадку, коли вони проходять під певними кутами. Таке розповсюдження характеризується модою, яка визначає тип розподілу електромагнітного поля.

Треба звернути увагу на те, що мода має взаємозв'язок з оптичними променями, на рисунку 2.2 зображено поширення оптичних променів в пластинчастому хвилеводу. Розповсюджуючись світлова хвиля являється горизонтально поляризованою та має відносно осі хвилеводу нахил ψ .

Звідси хвильовий фронт перпендикулярний напрямленню світла.

На рисунку 2.2 суцільною лінією позначена фазова поверхня з позитивним електричним полем, а штриховою лінією – з негативним полем.

Вважаючи, що горизонтально поляризована хвиля в вакуумі має довжину λ , то в серцевині з коефіцієнтом заломлення n_1 довжина хвилі зменшується до λ/n_1 , а постійне розповсюдження хвилі k/n_1 ($k=2\pi/\lambda$), навпаки, збільшується, притому постійна поширення уздовж осі:

$$\beta = kn_1 \cos\psi,$$

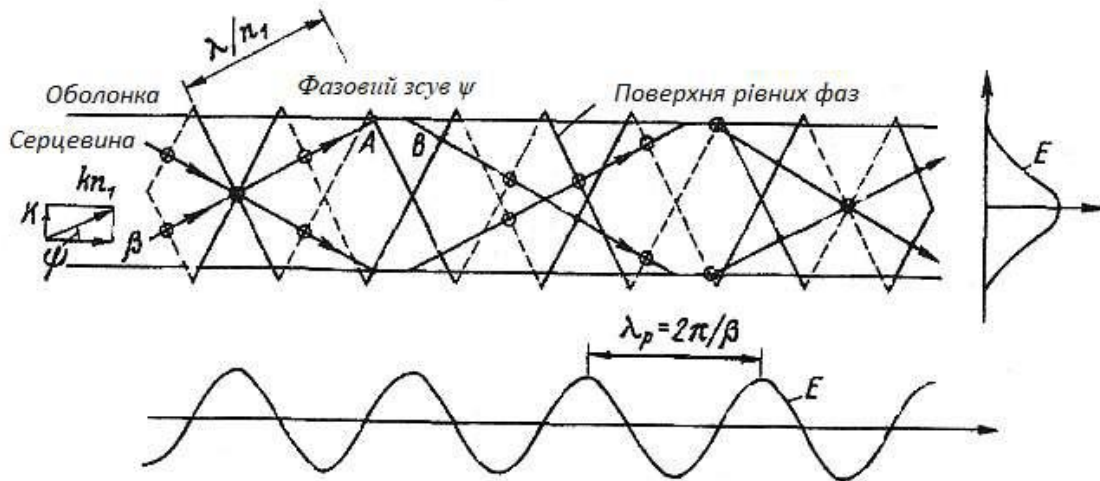


Рисунок 2.2 - Відповідність між світловим променем і модою

Якщо повне відбиття світла, падаючого в точку А (рисунок 2.2) можливо з'ясувати, що незначна частина енергії цього світла все ж таки проникає в оболонку.

Тому можна пояснити, що у точці В трохи зрушена фаза відносно точки А, уздовж горизонтальної осі. При цьому фаза відбитої хвилі також змінюється на деяку величину ψ , залежну від кута падіння світлового променя. Цей зсув відбитої хвилі і зміна її фази називається зсувом Гуса–Хенхена (Goos–Hänchen).

На рисунку 2.2 спрощено показані умови поширення основної моди. В центральній частині серцевини інтенсивність електричного поля збільшується та досягає максимуму внаслідок складання позитивних (можливо негативних) фазових фронтів світлових променів. Або навпаки, поблизу границі сердечник – оболонка позитивні і негативні фазові фронти взаємно компенсуються і електричне поле прямує до нуля.

При таких умовах розподілу електричного поля світла уздовж вертикальної осі представляє із себе стоячу хвилю. Цей розподіл багаторазово повторюється уздовж горизонтальної осі з періодом $\lambda_p = 2\pi/\beta$.

Для утворення стоячої хвилі необхідно, щоб при дзеркальному відображенні світлової хвилі вгору чи вниз сума змін фази по вертикалі в ході просування хвилі

за період відбиття і внаслідок зсуву Гооса-Генхена була б кратна 2π . Таким чином, для формування моди кут розповсюдження світлової хвилі не може бути довільним, і тільки світлові хвилі, у яких кут задовольняє вищезазначених умов, можуть поширюватись.

Зразки оптичних волокон наведені на рисунку 2.3.

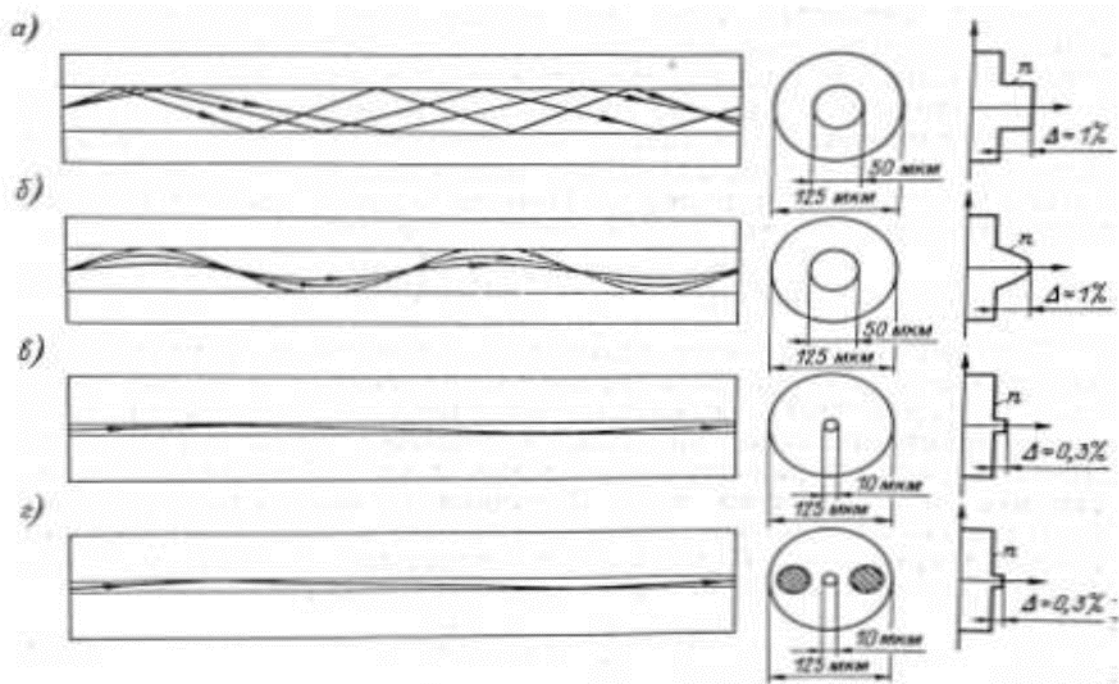


Рисунок 2.3 - Типи оптичних волокон: а – ступінчасте багатомодове; б – градієнтне багатоходове; в – одномодове; г – з подвійним променезаломленням.

При описанні характеристик оптичних волокон одним з важливих параметрів являється нормована частота. По її значенню можливо стверджувати на скільки багато мод може поширюватись в оптичному волокні. Нормована частота позначається v і визначається за формулою:

Для описаних нижче оптичних волокон із ступінчастою зміною коефіцієнта заломлення значення $v = v_c = 2,405$ являється граничною. Якщо дійсне значення v волокна менше, то розповсюджується одна мода, а якщо більше – поширюється багато мод.

Тому νc визначає умови існування в оптичному волокні однієї моди, або умови зрізу мод більш високих порядків. Величина називається довжиною хвилі зрізу. Оптичні волокна в області c довжиною, більшою λc , працюють в одномодовому режимі.

Зображені багатомодові оптичні волокна у яких нормована частота становить декілька десятків ($\nu \approx 30$) і в яких поширюються багато мод, а також одномодові оптичні волокна зі значенням ν більше 2,4, в яких поширюється лише одна мода.

В оптичному хвилеводі може одночасно поширюватися кілька просторових мод оптичного випромінювання. Кількість поширюваних мод залежить, зокрема, від геометричних розмірів оптоволоконна. Волокно, в якому поширюється більше однієї моди оптичного випромінювання, називається багатомодовим.

Багатомодове кварцове волокно має і серцевину, і оболонку з кварцового скла. В процесі виробництва шляхом легування вихідного матеріалу певними домішками досягається потрібний профіль показника заломлення. Якщо стандартне одномодове волокно має ступінчастий профіль показника заломлення (показник заломлення однаковий у всіх точках поперечного перерізу серцевини), то в разі багатомодового волокна найчастіше формується градієнтний профіль (показник заломлення плавно зменшується від 20 центральної осі серцевини до оболонки). Це робиться, для того щоб знизити вплив міжмодової дисперсії (рис.2.4).

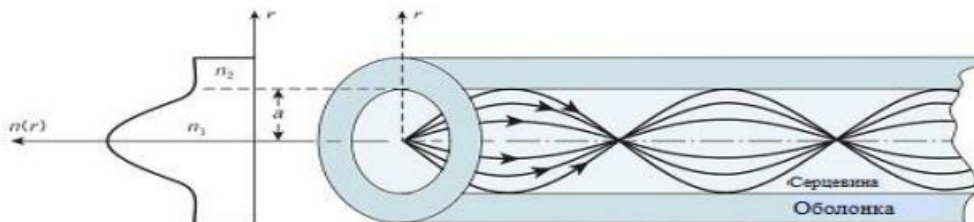


Рисунок 2.4 - Градієнтне багатомодове волокно

Кварцеве волокно має спектральну характеристику загасання з трьома вікнами прозорості – близько довжин хвиль 850, 1300 і 1550 нм. Для роботи з багатомодовим волокном в основному використовуються довжини хвиль 850 і 1300 (1310) нм. Типові значення загасання на цих довжинах хвиль - 3,5 і 1,5 дБ / км відповідно. Для захисту волокна, на оптичну оболонку наноситься первинне покриття з полімерного матеріалу (найчастіше акрилу), яке фарбується в один з дванадцяти стандартних кольорів. Діаметр оптоволокон з покриттям зазвичай складає близько 250 мкм. Волоконно-оптичний кабель складається з одного або декількох волокон з первинним покриттям, а також різних зміцнюючих і захисних елементів.

Через вплив міжмодової дисперсії (рисунок 2.5) багатомодове волокно має обмеження в швидкості і дальності поширення інформації в порівнянні з одномодовим. Довжину багатомодових ліній зв'язку обмежує також велике в порівнянні з одномодовим волокном, загасання.

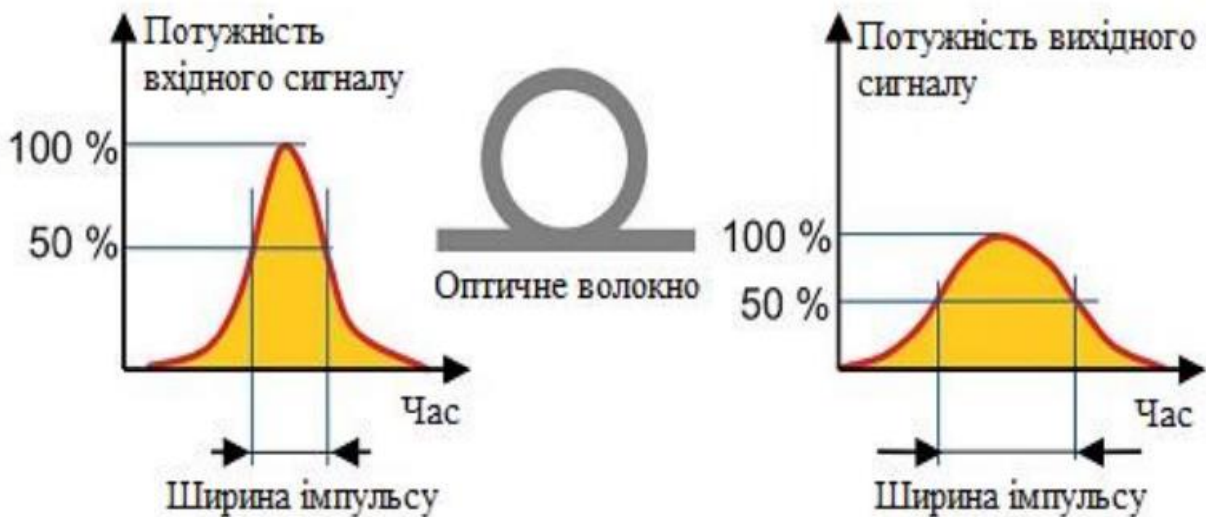


Рисунок 2.5 - Розширення імпульсу в багатомодовому волокні в результаті міжмодової дисперсії

2.2 Класифікація волоконно – оптичних датчиків тиску

Волоконно - оптичні датчики поділяються на 2 групи: на точкові та розподілені датчики.

Точкові датчики:

Чутливим елементом точкових датчиків є ґратки Брегга, які являють собою селектуюче дзеркало. Принцип роботи полягає в тому, що якщо в оптичне волокно завести випромінювання від широкосмугового джерела, то світло буде відображатися з вузькою спектральною смугою, а центр якраз і буде на довжині хвилі Брегга. Світло, яке збереглося, продовжуватиме йти в оптичному волокні без будь-яких втрат.

Довжина хвилі в бреггівських ґратах визначається показником заломлення серцевини та періодом решітки.

Точкові датчики бувають різних величин, таких як:

- температури;
- вібрації;
- лінійних переміщень;
- вібрацій;
- тиску;
- кута нахилу.

Розподілені датчики:

Розподілені датчики складаються з двох частин: вимірювального кабелю та опитувального пристрою, який має лазерне джерело. Така система може проводити вимірювання температур на великих відстанях.

Розподілені датчики вимірюють:

- температуру;
- деформацію.

У цій роботі буде розглянуто та розроблено волоконно – оптичний датчик тиску, чутливим елементом якого є бреггівські ґратки.

2.3 Область застосування та переваги волоконно-оптичних датчиків тиску

Необхідно відзначити загальні достоїнства оптичних волокон:

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

У практиці використання волоконно-оптичних датчиків мають найбільше значення останні чотири властивості. Достатньо корисні і такі властивості, як еластичність, малі діаметр і маса. Широкопосмуговість же і малі втрати значно підвищують можливості оптичних волокон, але далеко не завжди ці переваги усвідомлюються розробниками датчиків. Проте, з сучасної точки зору, у

міру розширення функціональних можливостей волоконно-оптичних датчиків в найближчому майбутньому ця ситуація потроху виправиться.

Як буде показано нижче, у волоконно-оптичних датчиках оптичне волокно може бути застосоване просто як лінія передачі, а може грати роль найчутливішого елемента датчика. У останньому випадку використовуються чутливість волокна до електричного поля (ефект Керра), магнітного поля (ефект Фарадея), до вібрації, температури, тиску, деформацій (наприклад, до вигину). Багато з цих ефектів в оптичних системах зв'язку оцінюється як недоліки, в датчиках же їх поява вважається швидше перевагою, яку слід розвивати і використовувати.

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

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

Основні переваги волоконно-оптичного датчика тиску:

- абсолютно неспроможні до перешкод та електромагнітних полів;
- стійкі до радіації;
- повністю відсутня необхідність електроживлення та заземлення;
- абсолютно пожежобезпечні та вибухобезпечні;
- датчик може знаходитися на великих відстанях від зчитувального пристрою (кілька десятків кілометрів);

- не можуть вразити електричним струмом;
- стійкість до різних температурних умов, до агресивних та хімічних середовищ;
- мала теплова інерційність та час відгуку;
- можна послідовно з'єднувати безліч датчиків в один ланцюжок;
- мають високий екологічний індекс безпеки навколишнього середовища;
- менша похибка порівняно з класичними рішеннями та більш висока роздільна здатність;
- можуть знижувати навантаження на структури об'єктів через свою невелику вагу;
- не схильні до впливу корозії;
- датчики малогабаритні і відповідно компактні.

Завдяки своїм унікальним характеристикам волоконно-оптичні датчики, чутливим елементом якого є бреггівські ґрати, застосовуються в багатьох областях таких, як:

1) Космос та авіація:

- бортова система моніторингу;
- внесення чутливих елементів до композиційних матеріалів.

2) Нафтова галузь:

- температурний моніторинг свердловин.

3) Електроенергетична галузь:

- моніторинг температури генераторів та вібрації;
- розподілений моніторинг силового кабелю.

4) Газова галузь:

- моніторинг трубопроводів.

5) Будівництво та ЖКГ:

- моніторинг стану теплотрас;
- моніторинг мостів;
- моніторинг елементів конструкції будівель, фундамент, перекриття;

б) Гідроенергетична галузь:

- моніторинг ГЕС.

7) Гірничодобувна галузь:

- моніторинг конвеєрних стрічок;
- пожежні сповіщення у шахтах;
- моніторинг гірничих виробок.

2.4 Принцип роботи волоконної ґратки Брегга

Волоконна бреггівська ґратка (ВБГ) є одновимірною решіткою показника заломлення з періодом $\Lambda \sim 300\text{-}500$ нм (Рисунок 2.6), наведена в серцевині волокна ультрафіолетовим лазерним випромінюванням за рахунок фотомодифікації її структури на довжині волокна.

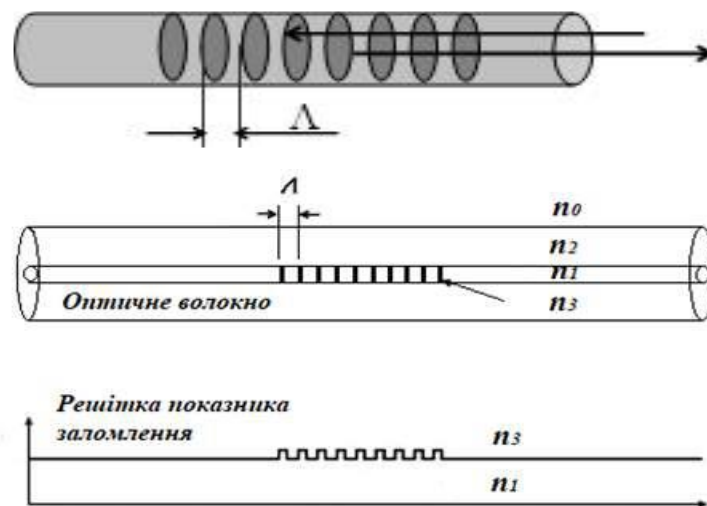


Рисунок 2.6 - Волоконна бреггівська ґратка

Основною властивістю ВБГ є вузькосмугове відображення випромінювання, що розповсюджується вздовж волокна на так званій бреггівській довжині хвилі, яка

визначається умовою конструктивної інтерференції пучків, відбитих від різних верств з різним показником заломлення:

$$\lambda_B = 2\Lambda(T, \varepsilon)n(T),$$

де n – показник заломлення серцевини волокна, T – температура, ε – відносна деформація ґрат.

Зовнішні дії (T, ε) на ґратку призводять до зсуву брегівського піку. Основним принципом роботи датчиків на основі ВБґ є вимірювання зсуву брегівського спектрального максимуму як функції температури або деформації ґратки ε . Використання кількох ВБґ - датчиків в одному оптичному волокні можливе, наприклад, шляхом запису в різних точках волокна ґрат з різними положеннями брегівських піків (на різних довжинах хвиль), дивитись Рисунок 2.6.

На рисунку 2.7 наведено виміряні спектри відображення трьох ВБґ на різних довжинах хвиль при температурі навколишнього середовища 25°C та при нагріванні однієї ВБґ до температури 54°C .

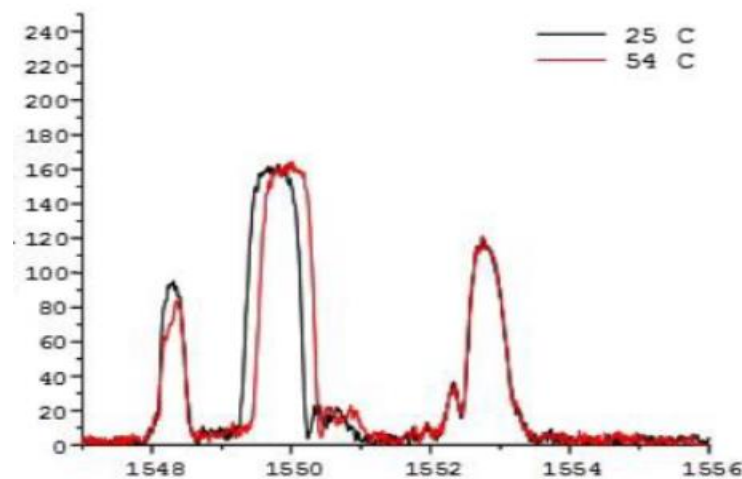


Рисунок 2.7 - Спектри відображення трьох волоконних брегівських ґрат при температурі навколишнього середовища 25°C та при нагріванні однієї з ґрат до температури 54°C

2.5 Волоконна бреггівська ґратка як чутливий елемент

У фазових інтерферометричних датчиках (ФІД) на основі масивів ВБГ чутливим елементом виступає саме ОВ, що веде до значного зниження собівартості. Відрізок ОВ між двома ґратками є інтерферометр Фабрі-Перо.

Під впливом деформації і акустичних коливань змінюється різниця фаз сигналів від двох сусідніх бреггівських ґраток. Інтерферометричні датчики мають найбільшу чутливістю до зміни довжини відрізка волокна під впливом зовнішніх чинників. Принцип дії розподілених волоконно-оптичних вимірювальних комплексів на основі ФІД в найпростішому випадку (у разі одного ФІД) (Рисунок 2.8.) і полягає в наступному. Кожна з ґраток Брегга РБ1 і РБ2 датчика відображає імпульс, що надходить на неї від імпульсного лазера, на одній і тій же довжині хвилі Брегга. При цьому тимчасова затримка між відбитими імпульсами дорівнює подвоєному часу поширення світла в чутливому елементі датчика - волокні, укладеному між ґратками.

Відбиті імпульси надходять в компенсуючий інтерферометр (КІ), який, в свою чергу, також роздвоює кожен з них. затримка, вноситься в поширення імпульсів плечем 2 КІ по відношенню до плеча 1, забезпечує перекриття в часі імпульсу, відбитого від ґратки РБ1, на виході плеча 2 і імпульсу, відбитого від ґратки РБ2, на виході плеча 1 і зсув їх по фазі на $\varphi_0 = \pi/2$.

Зміна в часі деформації чутливого елемента датчика в результаті зовнішнього впливу викликають зміна різниці фаз інтерферуючих імпульсів. Останнє перетворюється фотоприймачем (ФП) в зміну величини струму. Додатковий зсув фаз $\varphi_0 = \pi/2$ між інтерферуючими імпульсами забезпечує роботу фотодетектора на ділянці максимальної крутизни, а рівність інтенсивностей інтерферируючих імпульсів дозволяє отримати максимальну амплітуду сигналу на виході фотоприймача.

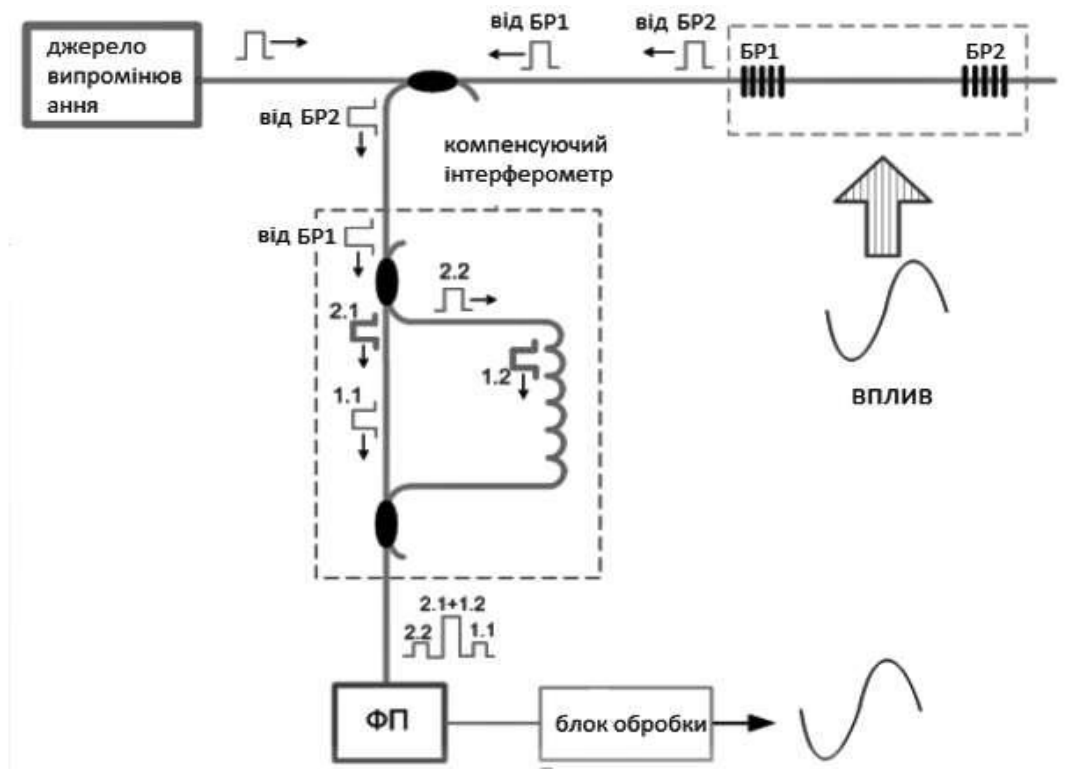


Рисунок 2.8 - Принцип дії волоконно-оптичної системи вібро-акустичного моніторингу на основі бреггівських ґраток

Для створення масиву датчиків на одному волокні використовується тимчасове (якщо ВБГ мають однакову довжину хвилі відбиття) і спектральне ущільнення (поодинокі датчики складаються з ВБГ що працюють на різних довжинах хвиль відбиття). Використання волоконних ґраток Брегга для формування ФІД дозволяє об'єднувати в одному кабелі велику кількість сенсорів, розрізняючи сигнали від окремих гідрофонів по довжині хвилі і тимчасовій затримки.

2.6 Волоконно-оптичні датчики на ґратах Брегга

Розвиток технології виробництва оптоволоконних кабелів дало поштовх до розвитку ще однієї конструкції, а саме датчиків з вбудованими в оптоволоконно

гратами Брегга, налаштованими на певну довжину хвилі, Рисунок 2.9а. Чутливий елемент таких датчиків - волоконна бреггівська решітка, яка є періодичною структурою, сформованою в оптичному волокні, здатну відображати вузький спектр довжин хвиль. Такі датчики працюють наступним чином: тиск через пружний елемент передається на місце оптоволокна, де сформовані грати.

Лазер, розташований в аналізаторі сигналів, посилає кілька довжин хвиль N разів на секунду.

Волоконна бреггівська решітка відображає випромінювання без зміни, а при зовнішній дії зміщується довжина хвилі і на фотоприймачі повертається змінений сигнал. По зміні довжини хвилі датчика визначаються характеристики зовнішнього на датчик, як показано на Рисунку 2.9б.

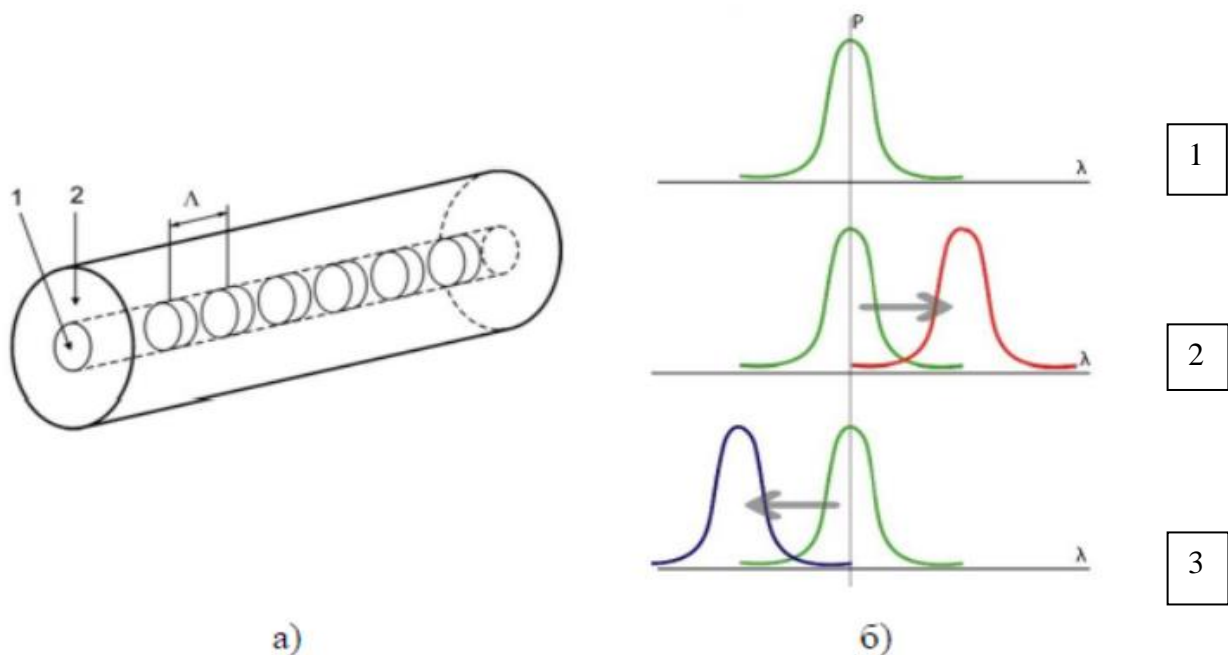


Рисунок 2.9 – а) Волоконні бреггівські грати, де 1 – серцевина, 2 – кожух, Λ – крок ґрат; б) Зміна відбитої хвилі, 1 - Без впливу; 2 - Збільшення кроку через нагрівання/розтягування; 3 - Зменшення кроку через охолодження/стиснення.

Довжина хвилі 1510-1590 нм, діапазон вимірюваного тиску 0 - 10 МПа з роздільною здатністю тиску 0,05% і точністю вимірювання тиску 0,5% на весь діапазон.

Волоконно-оптичні датчики тиску серії OSP – 551, що використовують оптоволокну з ґратами Брегга призначені для вимірювання тиску в гідротехнічних спорудах (Рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 - Волоконно-оптичний датчик тиску серії OSP – 551

Датчики використовують оптоволокну з решіткою Брегга і призначені для вимірювання навантаження та ваги на різні підстави та конструкції ASTRO A565 (Рисунок 2.11 а), а також тиску рідин та газів - ASTRO A561 (Рисунок 2.11 б). ASTRO A565 дозволяє спостерігати за деформаційними процесами, що виникають в інженерних спорудах. Діапазон вимірюваного тиску 0 – 1,8 МПа з наведеною похибкою 0,35 % у діапазоні температур мінус 30°C до плюс 80°C. Довжина хвилі 1500 – 1600 нм. Для ASTRO A561 діапазон вимірюваного тиску 0 – 10 МПа з наведеною похибкою 0,2 % у діапазоні температур мінус 30 до плюс 80 °С.



Рисунок 2.11 – а) Волоконно-оптичний датчик навантаження та ваги ASTRO A565 ; б) Волоконно-оптичний датчик тиску або рівня ASTRO A561

До переваг даних датчиків можна віднести високу перешкодозахисність, нечутливість до електромагнітних перешкод, таких як НВЧ-поле, іскровий розряд, магнітні поля, електромагнітні імпульси різної природи та будь-якої інтенсивності, електробезпека, пов'язана з відсутністю електричних ланцюгів між датчиком і реєструючим модулем, вибухова та пожежна безпека. Але при цьому датчики вимагають використання дорогого реєструючого та обробного обладнання.

Відома конструкція амплітудного волоконно-оптичного датчика тиску, показана на Рисунку 2.12.

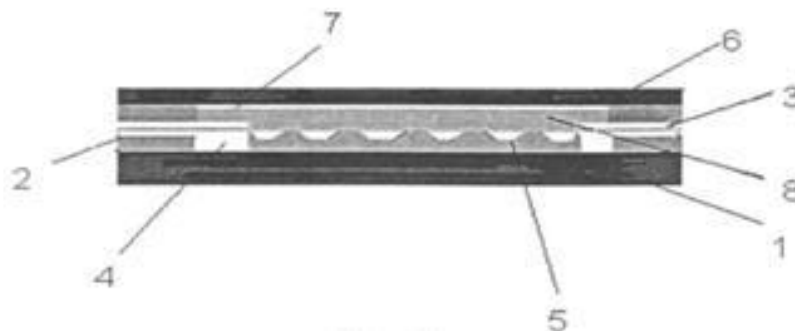


Рисунок 2.12 - Конструкція датчика: 1 – корпус, 2 – пропускний канал, 3 – оптоволокло 50/125 мкм, 4 – паз з рифленою поверхнею -5, 6 – кришка, 7 – виїмка, 8 – притискна пластина

Волоконно-оптичний датчик тиску, виконаний на основі оптичного волокна, містить ділянки введення та виведення випромінювання, а також ділянку, розміщену в пропускному каналі гумового корпусу прямокутного перерізу. Ділянки введення та виведення випромінювання оптичного волокна пропущені через металевий корпус. Пропускний канал включає ділянку з рифленою поверхнею в основі для розміщення оптичного кабелю паралельно основи корпусу. Оптичне волокно в пазі притиснуто до вершин виступів рифленої поверхні пластиною з термостійкої гуми.

На кінцях ділянок введення та виведення випромінювання оптичного волокна встановлені оптичні роз'єми. Тиск прикладається до гумової пластини, яка притискає оптоволокно до виступів основи, оптоволокно згинається, і амплітуда оптичного сигналу згасає. Інформація взята з бази патентів та будь-яких характеристик або габаритів датчика не наведено, проте зазначено, що даний датчик може підійти для вимірювання ваги рухомих об'єктів, машин, вагонів поїзда та ін., а також для автоматичного контролю технічного стану рейкового рухомого складу у процесі його експлуатації шляхом вимірювання динамічних навантажень, що надаються рухомим складом датчик.

Принцип модуляції оптичного сигналу аналогічний конструкціям з використанням решіток Брегга, проте габаритні параметри чутливого елемента датчика виходять далеко за межі габаритів MEMS пристроїв. Відомий мікромеханічний волоконно-оптичний датчик тиску, який виконаний на основі оптичного волокна, що містить ділянки введення та виведення випромінювання, а також ділянку з ґратами Брегга, розміщений у пропускному каналі корпусу, Рисунок 2.13, а.

Пропускний канал виконаний у вигляді паза з рифленою поверхнею в основі кремнієвих кристалів, на яких сформовані мембрани однакової товщини h_m , при цьому перша мембрана має один квадратний жорсткий центр (Рисунок 2.13 в), розміщений у центрі, друга мембрана - два однакові квадратні жорсткі центри

(Рисунок 2.13 г), розташованих уздовж ділянки оптичного волокна з відривом І по обидва боки від центру мембрани.

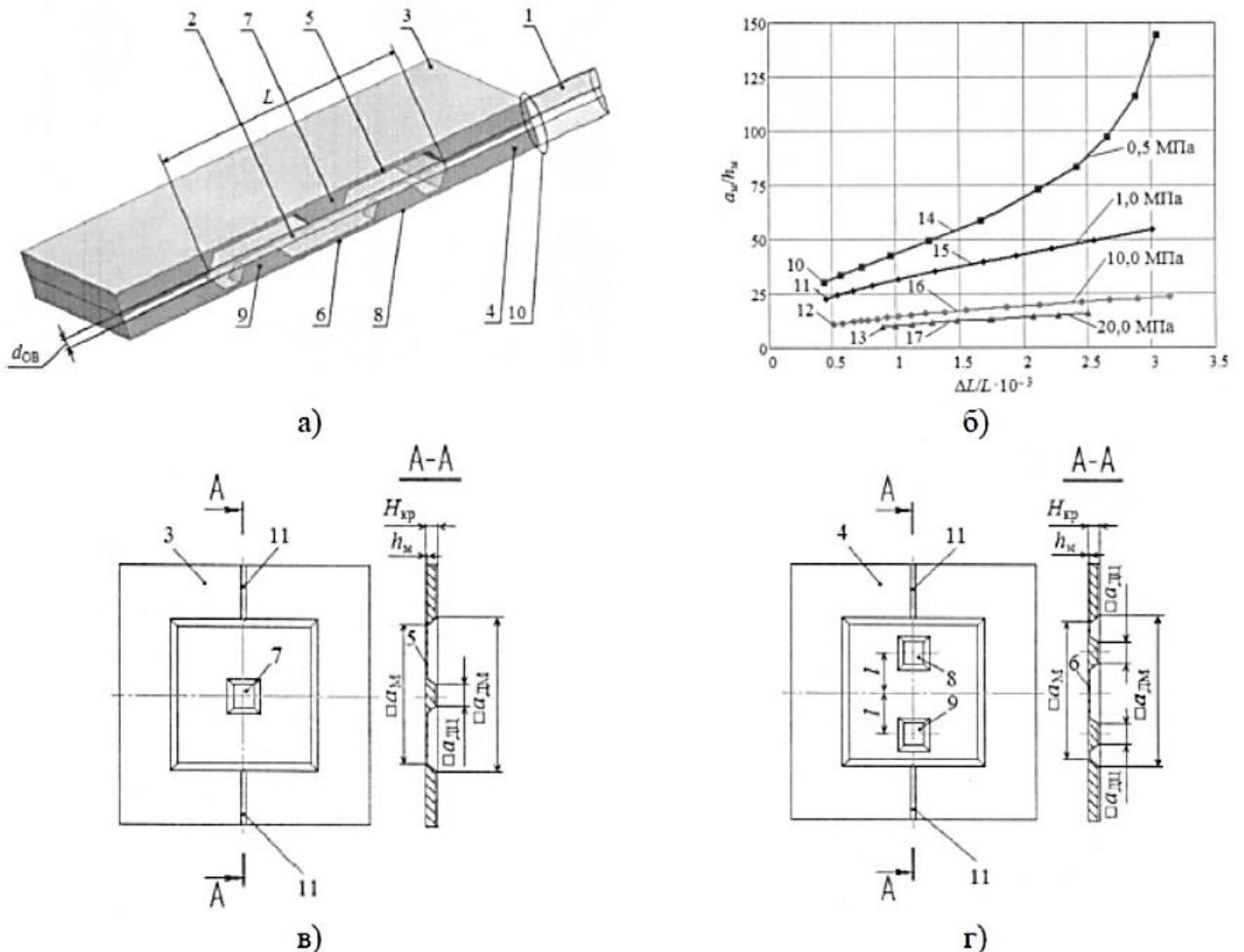


Рисунок 2.13 - а) Мікромеханічний волоконно-оптичний датчик тиску, переріз, де 1 – ОВ, 2 – ґрати Брегга, 3 – кристал з одним ЖЦ, 4 – кристал із двома ЖЦ, 5,6 - ЖЦ; б) Залежність зміни відносин розмірів мембран кремнієвих кристалів до товщини мембран від впливу тиску і залежність зміни відносин розмірів мембран кремнієвих кристалів до товщини мембран від відносного подовження оптичного волокна; в) Кремнієвий кристал з одним ЖЦ; г) кремнієвий кристал із двома ЖЦ.

Волокно в пазі притиснуте до вершин жорстких центрів. Під дією вимірюваного тиску оптоволокно розтягується жорсткими центрами, і змінюється відбита довжина хвилі решітки Брегга, як показано на Рисунку 2.13 б.

По зміні відбитої довжини хвилі визначається величина тиску, що вимірюється. Така конструкція мікромеханічного волоконно-оптичного датчика тиску дозволяє вимірювати тиск до 20 МПа. Даних про нелінійність перетворювальної характеристики не наведено. Датчик має малі масогабаритні параметри, і навіть можливість розрахунку конструктивних параметрів під певний діапазон тисків. Однак для роботи датчика необхідно використовувати високоякісне одномодове оптоволокно та досить складну систему обробки сигналу.

Ще один недолік датчика такого типу – температурна залежність, яка виявляється сильнішою, ніж для тензорезистивних, що у свою чергу потребує складної системи компенсації. Цікавим рішенням даної конструкції є використання жорстких центрів передачі тиску на оптоволокно.

2.7 Фотоелектричні датчики тиску

Останнім часом, поряд з традиційними сенсорами тиску, що працюють на тензорезистивному, ємнісному та п'єзоелектричному ефектах, стали досліджуватися датчики на фотоелектричному та фотовольтаїчному ефекті.

В таких сенсорах дія вимірюваного тиску призводить до переміщення кінця оптоволокна щодо фотоприймача, внаслідок чого змінюється площа його засвічення та вихідний сигнал. На даний момент систематичних досліджень конструктивних та технологічних основ створення датчика тиску на фотовольтаїчному ефекті з фотодіодами, розташованими всередині датчика, досі не проводилися. Детальні дослідження варіантів конструкції, впливу розмірів та положення УЕ, розмірів та параметрів оптоволокон на характеристики датчика дозволять створити початкову базу для подальших розробок датчиків. У відкритих

інформаційних джерелах провідних фірм розробників немає даних про випуск прецизійних фотоелектричних кремнієвих датчиків тиску (КФДТ), виготовлених на основі кремнієвої MEMS технології. Є приклади виконання датчиків тиску з використанням дискретних фотодіодів, розсіяного та сфокусованого світла.

Показана можливість створення волоконно-оптичного датчика тиску, що містить профільовану шляхом анізотропного травлення кремнієву мембрану з жорстким центром, багатомодове оптоволокно, закріплене V-канавці на рамці мембрани і лежаче на жорсткому центрі, і флуоресцентні диски з неодимового рамці навпроти вільного кінця ВВ. Датчик працює наступним чином: через ВВ від зовнішнього джерела надходить некогерентне випромінювання, що потрапляє на флуоресцентні диски, випромінювання викликає свічення в дисках, мембрана згинається під дією тиску, вільний кінець ВВ відхиляється і викликає зміну інтенсивності свічення дисків, по різниці часу флюорес. Використовуючи фазочутливу схему обробки сигналу реєструється зворотне випромінювання в оптоволокну. В експерименті використовувалося оптоволокно 110/140 мкм, кремнієва пластина з орієнтацією (100), неодимові диски з часом флюоресценції 50 мкс та 1 мс, мембрана зі стороною від 2 до 4 мм та товщиною від 40 до 80 мкм. Чутливість визначалася з прогину мембрани $S=0,0074 a^4/h^3$ (мкм/бар), де a - сторона мембрани, h - її товщина. При випромінюванні, що дорівнює 1 мВт, $a = 2$ мм, зміна інтенсивності склала 35 нВт/бар.

До плюсів даної конструкції можна віднести повну відсутність живлення та виділення тепла в області вимірювання тиску, однак у публікації відсутні будь-які дані за формою вихідного сигналу, температурних залежностях як неодимових дисків, так і перетворювальної характеристики датчика в цілому. Також у статті не розглядалися питання нелінійності перетворювальної характеристики.

Датчик тиску також використовує прогин мембрани, але також додатково перетворює оптичний сигнал електричний за допомогою фотодіода розміщеного на краю рамки мембрани, як показано на Рисунку 2.14 (а-б). При цьому не потрібно

електричного живлення датчика і він працює за принципом вимикача, налаштованого на певний тиск.

Даний датчик складається з наступних частин:

- Кремнієвого профільованого кристала з жорстким центром на тонкій мембрані, з V-канавкою та світлочутливим p-n переходом;
- Стандартного оптоволоконна діаметром 150 мкм, розташованого у V-канавці та зафіксованого за допомогою клею до ЖЦ та рамки, вільний кінець якого спрямований на p-n перехід;
- Кремнієвого кристала, що виступає як буферний шар між корпусом і робочим профільованим кристалом;
- Корпуси.

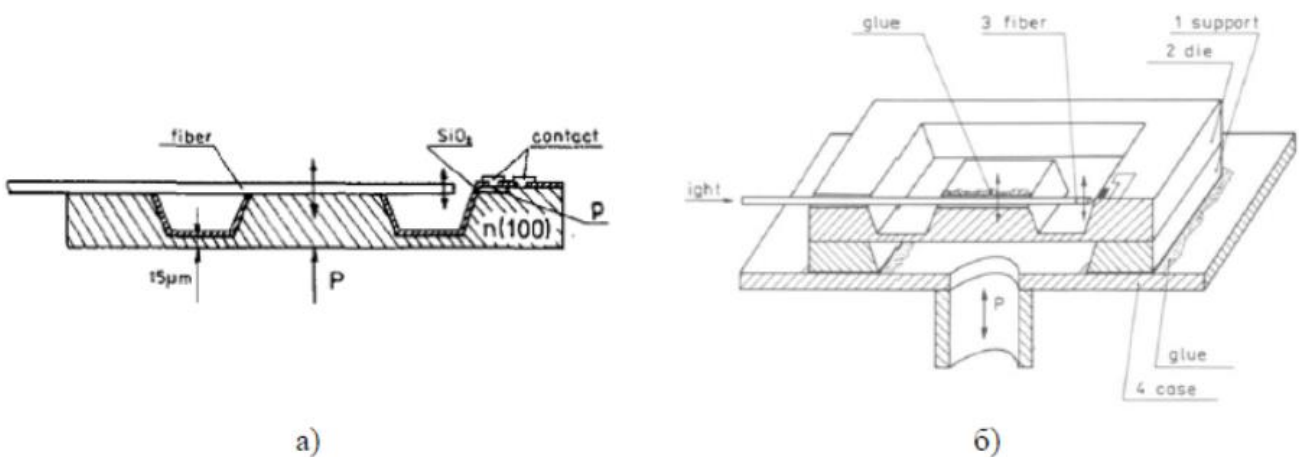


Рисунок 2.14 – а) Схема оптоволоконного датчика з електричним вихідним сигналом, перетин; б) складання датчика [23]

Датчик працює наступним чином: вільний кінець спрямований на p-n перехід і висвітлює його пропорційно відхилення мембрани за світло тиску рідини або газу, що подається з зворотного боку тиску. Світло в оптоволоконно надходить ззовні: може бути використана галогенна лампа, сонячне світло або лазер. P-n перехід фоточутливого елемента генерує фотовольтаїчний пропорційний сигнал засвіченню, який змінюється при будь-якому відхиленні волокна.

Для виготовлення датчика використовувалися кремнієві пластини діаметром 7.62 см із кристалографічної орієнтацією (100). Травлення проходило у водному розчині КОН за температури 80 °С.

Як очевидно з графіка залежності, характеристика має 3 ділянки: 1) зростання вихідного сигналу діапазоні тисків 0-0.38 бар; 2) псевдополог максимум при 0.38-0.6 бар; і 3) зменшення вихідного сигналу 0.6-1.6 бар. Чутливості ділянок 1 та 3 +240 та -80 мВ/бар, відповідно. Максимальний прогин мембрани 500 мкм.

Параметри датчика тиску наведено у таблиці 1 [23].

Даний датчик має високу чутливість, не вимагає електричного живлення, при цьому сам виробляє електричний вихідний сигнал, який є вибухо- та пожежобезпечним. Однак є ряд недоліків, до яких можна віднести великі розміри кристала, сильну температурну залежність вихідного сигналу, малий діапазон вимірюваних тисків, високий початковий сигнал, який залежить від положення оптоволокна і вихідний сигнал нелінійної форми. Наслідком нелінійності вихідного сигналу є ускладнення системи обробки вихідного сигналу, що може зашкодити кінцевій вартості датчика та його застосування у вимірювальних системах.

Таблиця 1 - Параметри датчика тиску

Параметр	Значення
Розміри кристала, мм	10×8,5×0,5
Розміри мембрани a×b×h, мм	6×6×0,02
Розміри ЖЦ ε, мм	≈3×3
Діаметр оптоволокна, мкм	150
Відстань від кінця ОВ до р-п переходу, мкм	100
Чутливість, мВ/бар	+240, -80
Джерело живлення	Світло ≈100 Вт, без спец. з'єднання
Overpressure, Бар	3

Відомий фотоелектричний датчик тиску рідини діапазон тисків від 0,02 до 8 кПа на дискретних елементах [37]. Автори використовували диференціальну схему, в якій застосована пара планарних дифузійних фотодіодів, де один є діодом порівняння, а інший - діод, що детектує, розташованим навпроти регулюючої потік шторки, закріпленої на рухомій мембрані, як показано на Рисунку 2.15.

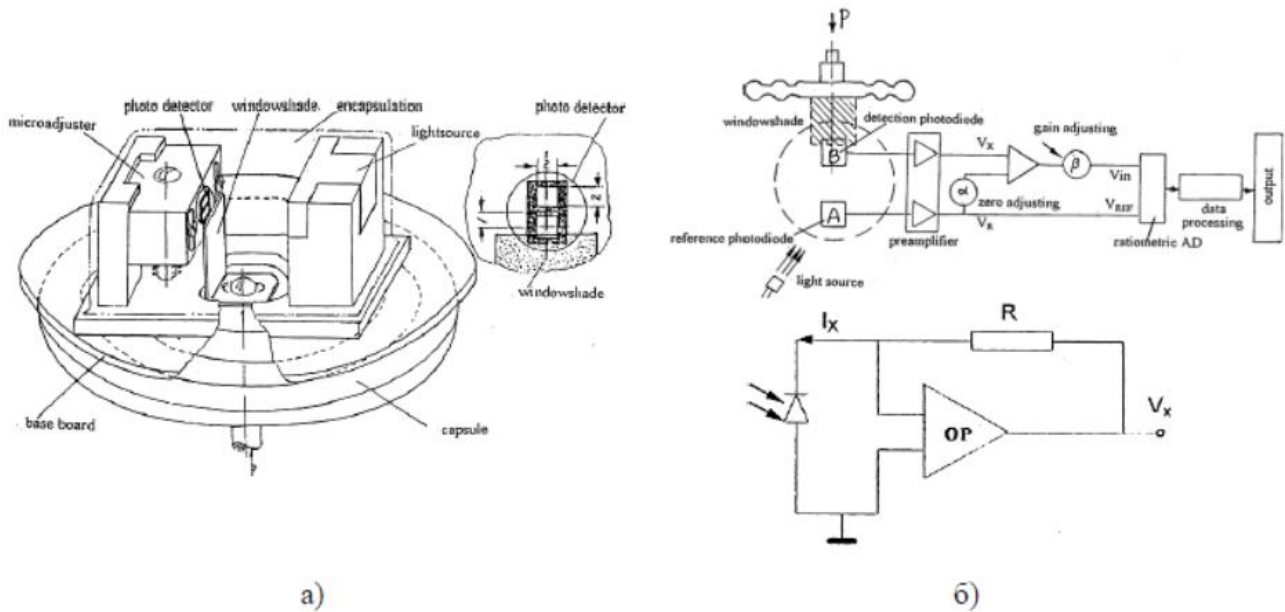


Рисунок 2.15 – а) Загальний вигляд фотовольтаїчного датчика тиску з парою дискретних фотодіодів, шторкою закріпленою на рухомій мембрані і кристал зі світлодіодом; б) схема перетворення тиску у вихідний сигнал [37]

Електричний вихідний сигнал з нелінійністю 0,3% отриманий з використанням схеми обробки сигналу наведеної на Рисунку 2.15 б. Активна площа використовуваних фотодіодів була 2×2 мм². Мінусом даної конструкції є великі габаритні розміри датчика через застосування дискретних елементів конструкції. Схема перетворення дозволяє нівелювати вплив старіння фотодіодів та зміни в джерелі випромінювання, хоча на практиці, як і раніше, потрібне стабілізоване джерело живлення з оптичним зворотним зв'язком через фотодіод.

Відомий інтегральний перетворювач тиску (ІПТ), що використовує фотовольтаїчний ефект [38], від зверху якого показаний на Рисунку 2.16 а, а на Рисунку 2.16 б - його поздовжній розріз. Перетворювач складається з консольної балки на кремнієвій основі. На консоль нанесено краплю люмінофора, освітленого світлодіодом. Навпроти балки розміщено МДП-фотодіод.

ІПТ працює в такий спосіб. Випромінювання від світлодіода ініціює власне випромінювання люмінофора. Світлонепроникне покриття перешкоджає проникненню випромінювання від світлодіода у фоточутливу область фотодіода.

За відсутності зовнішнього впливу мембранна консоль не викривлена, тому випромінювання від люмінофора також не потрапляє у фоточутливу область фотодіода. Під дією зовнішнього тиску вільний кінець консолі опускається і випромінювання від люмінофора потрапляє в торець напівпровідника опорної основи поблизу ОПЗ. Оскільки відстань від ОПЗ до краю опорної основи менше дифузійної довжини носіїв заряду, фотогенеровані носії потрапляють в область ОПЗ, викликаючи фотострум у зовнішньому ланцюзі фотоприймача.

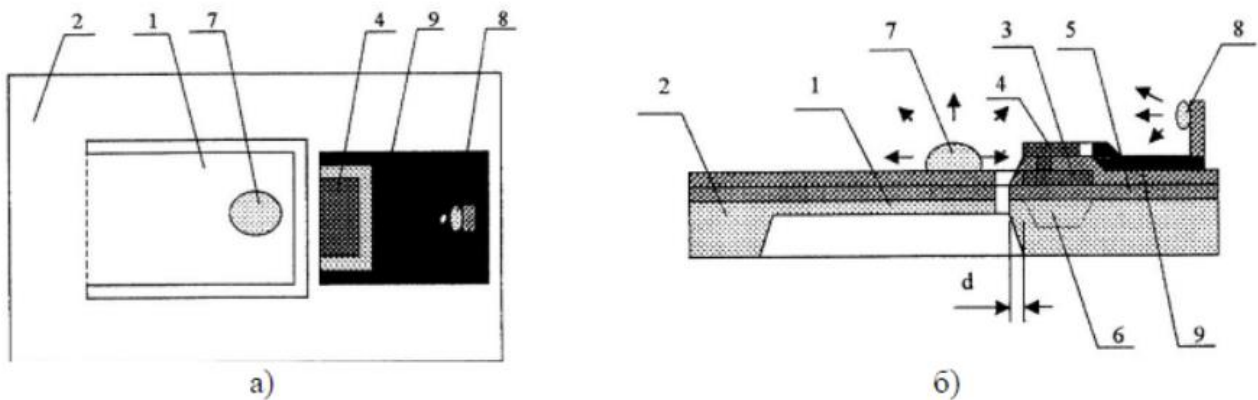


Рисунок 2.16 – а) ІПД: робоча поверхня; б) поперечний розріз, де 1 – консольна балка; 2 – рамка; 3,4 та 5 елементи МДП фотодіода, 6 – ОПЗ фотодіода, 7 – крапля люмінофора, 8 – опорна основа зі світлодіодом; 9 світлонепроникне покриття [38]

Чим сильніше прогинання консолі, тим більше величина фотоструму в межах механічної міцності конструкції. Таким чином, реалізується перетворення зовнішнього тиску електричний сигнал. Спосіб передачі тиску на балку не описаний, але з огляду на відкритий доступ вимірюваного середовища до електродів датчика сильно обмежується сфери його застосування. Відомий волоконно-оптичний датчик на дискретних елементах [39], переріз якого показано на Рисунку 2.17 (а-б).

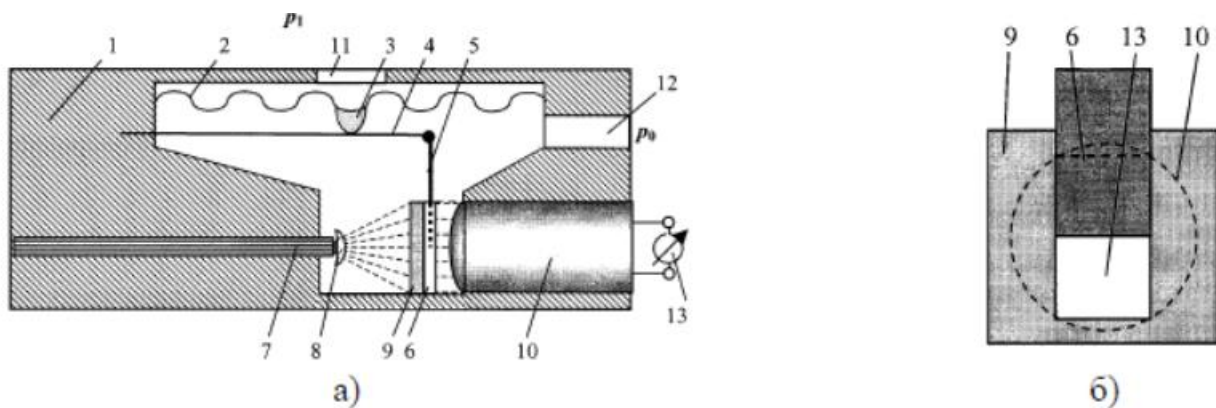


Рисунок 2.17 - Схема волоконно-оптичного датчика тиску; б) вид на рамку з боку світловоду, де 1 - корпус, 2 - пружна мембрана з упором 3, 4 консоль, і 5 - світлонепроникна перегородка, 6 - напрямні, 7 - світловод, 8 - лінза, що розсіює, 9 - рамка зі світловою щілиною, 10 - фотоприймач, 11 і 12 отвори для тиску [39]

Датчик містить корпус, в якому закріплений світловод і фотоприймач, між якими розміщена рухома консоль з шторкою, що частково перекриває оптичне випромінювання. Консоль рухається через упор, розміщений на мембрані, яку впливає зовнішній тиск. Вимірюваний тиск подається на пружну мембрану, яка чинить тиск на консоль, шторка починає перекривати фотоприймач, сигнал якого пропорційний інтенсивності засвічення. Фотострум реєструється зовнішнім вимірювальним приладом. Очевидними недоліками є великі габаритні параметри дискретних елементів, і навіть нелінійна форма вихідного сигналу. Конструктивні

особливості та форма вихідного сигналу скорочує можливі сфери застосування датчика.

Конструкція [40] є аналогом волоконно-оптичного датчика тиску [39]. Оптичне випромінювання подається на нерухоме волокно, центр якого розташований навпроти рухомого оптоволокна, як показано на Рисунку 2.18 а.

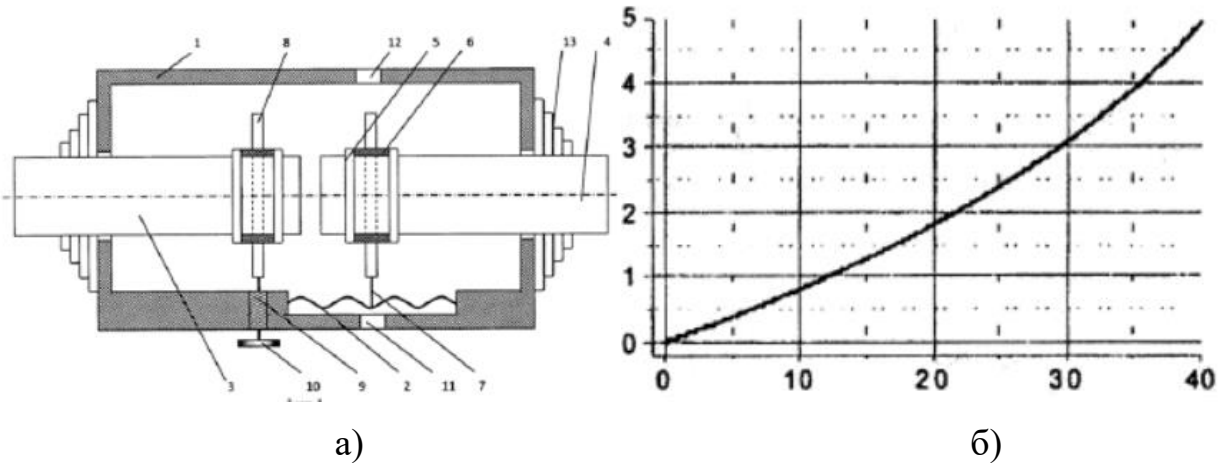


Рисунок 2.18 - а) Схема волоконно-оптичного датчика тиску, де 1 - корпус, 2 - пружна мембрана, 3 - фіксований і 4 - рухомий світловоди, 5 - світловод, 6 - хомут фіксації, 7 - штанга, 8 - лінза, що розсіює, 9 і 10 - підстроювальні гвинти, 11 і 12 отвори для тиску, 13 - сальник; б) залежність оптичних втрат від поперечного переміщення[40]

Під дією вимірюваного тиску мембрана прогинається, штанга піднімає рухоме волокно, тим самим збільшуючи оптичні втрати системи датчика. Додавання в конструкцію кілець ущільнювачів забезпечує можливість використання датчика у вибухонебезпечних середовищах. Основна відмінність полягає в тому, що фотоприймач винесений за межі чутливого елемента. До плюсів конструкції можна віднести простоту конструкції та мініатюрні розміри чутливого елемента (ЧЕ), проте вихідний сигнал такого датчика має нелінійну залежність і вимагає додаткової обробки та калібрування, як показано на Рисунку 2.18 б.

2.8 Висновки до розділу 2

У розділі було розглянуто види волокно – оптичних датчиків, та його класифікація. Також було вивчено принципи роботи волоконно – оптичних датчиків та бреггівських ґрат, які є чутливим елементом у датчика тиску.

При аналізі технічного завдання було прийнято рішення про внесення зміни до конструкції датчика, а саме, замість заглушки, яка пропускає тиск, поставити мембрану, так як вона має високу чутливість і має хороші метрологічні характеристики. Сукупність цих ознак призводить до підвищення точності датчика.

3 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕМБРАНИ ВОЛОКОННО – ОПТИЧНОГО ДАТЧИКУ ТИСКУ

3.1 Розрахунок мембрани

При огляді існуючих патентів виявлено недоліки конструкції, а також недоліки деяких параметрів датчиків, що впливає на точність вимірювання тиску.

Проаналізувавши ці недоліки, було прийнято рішення покращити конструкцію, а саме замість заглушки у волоконно – оптичного датчика тиску, поставити мембрану, яка задовольнятиме умови технічного завдання, а також завдяки її наявності будуть покращені фізичні характеристики датчика.

Мембрана є гнучкою пластиною, вона може бути як круглою, так і квадратною, під впливом тиску мембрана отримує значні прогини. Вони можуть бути як плоскими, так і гофрованими, їх застосовують як пружні елементи манометричних приладів, клас точності яких досить високий. Також мембрани використовують як роздільник середовищ [12].

Для проведення розрахунків та моделювання було обрано мембрану з жорстким центром, закріплену по краях та навантажену тиском.

Матеріалом для мембрани вибрано сталь 36НХТЮ, дана сталь є прецизійним сплавом, до якого можна задати необхідні властивості пружності. Вибраний сплав використовується для пружних елементів різних приладах, які працюють при дії температури до 240°C.

Робочий діаметр мембрани визначається виходячи з габаритних заданих розмірів датчика, прогином центру, заданим запасом міцності та інших технологічних вимог, що пред'являються до мембрани. Зазвичай діаметри мембран варіюються від 10-300 мм.

Для початку буде наведено кілька залежностей, виходячи з яких, буде побудовано 3D-модель мембрани для дослідження в програмі SolidWorks Simulation.

Виразимо максимальний припустимий тиск, яким можна навантажити мембрану, виходячи з її характеристик.

$$P_{max} = 1.5 \cdot \sigma_{пред} \cdot \frac{h^2}{R_0^2}$$

Так як P_{max} задано в технічному завданні і дорівнює 100 МПа, а $\sigma_{пред}$, яке визначає межу короткочасної міцності, заданий у властивостях матеріалу сталі 36НХТЮ і значення його дорівнює 1170 МПа, то можна виразити товщину мембрану в залежності від її радіусу .

$$h = \sqrt{\frac{P_{max}}{1.5 \cdot \sigma_{пред}} \cdot R_0}$$

Підставимо задані значення, щоб розрахувати товщину мембрани.

$$h = \sqrt{\frac{100}{1.5 \cdot 1170}} \cdot 12 = 2.9 \text{ мм}$$

Досліджуючи отримані значення, можна побудувати графік, який відобразить залежність товщини мембрани від її радіусу, оскільки габаритні розміри волоконно – оптичних датчиків бувають різні, а відповідно радіус мембрани, виходячи з цього, змінюється, то даний графік істотно полегшить вибір товщини мембрани. Також завдяки йому можна виконати перевірку отриманої товщини мембрани, яка дорівнює 2.9 мм щодо заданого радіуса 12 мм, і отримати повну відповідність (Рисунок 3.1).

З отриманого графіка можна дійти невтішного висновку, що чим більше радіус мембрани заданий, тим більшу товщину матиме мембрана у тому, що витримати максимальне заданий тиск.

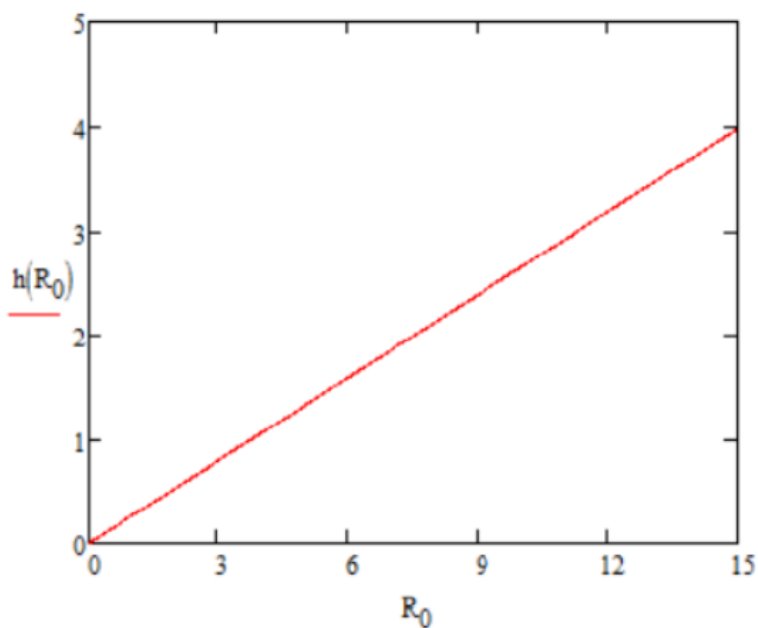


Рисунок 3.1 – Графік залежності товщини мембрани від її радіусу

Визначимо радіус жорсткого центру мембрани, виходячи з радіуса самої мембрани:

$$r = 0.4 \cdot R_0 = 0.4 \cdot 12 = 4.8, \text{ мм}$$

Також можна визначити залежність, що виражає переміщення жорсткого центру мембрани:

$$\varepsilon = A_p \cdot \frac{P \cdot R_0^4}{E \cdot h^3},$$

$$\text{де } A_p = \frac{3 \cdot [1 - \mu^2] \cdot [c^4 - 1 - 4 \cdot c^2 \cdot \ln(c)]}{16 \cdot c^4}$$

коєфіцієнт, який залежить від ставлення

радіусу до радіусу її твердого центру $c = \frac{R_0}{r}$;

μ - коефіцієнт Пуассона;

P - вимірюваний тиск;

R_0 – радіус мембрани;

E – модуль пружності;

h – товщина мембрани.

Підставимо у вираз та отримаємо залежність деформації центру мембрани від радіусу:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot [1 - \mu^2] \cdot [c^4 - 1 - 4 \cdot c^2 \cdot \ln(c)]}{16 \cdot c^4} \cdot \frac{P \cdot R_0}{\sqrt{\frac{3}{2} \frac{P_{max}}{1.5 \cdot \sigma_{пред}} \cdot E}}$$

У цій формулі змінним значенням є P - тиск, так як при подальшому дослідженні буде змінюватися тільки тиск, що подається, тому переміщення центру мембрани буде відрізнятися. Відповідно інші величини залишаються незмінними.

3.2 Моделювання прогинів мембрани

Зробимо моделювання мембрани при двох значеннях тиску, що подається, при 1 МПа і максимальному допустимому тиску 100 МПа.

Етапи проведення дослідження схожі, такі як:

1) Вибір матеріалу сталь 36НХТЮ.

Характеристики стали:

- Модуль пружності: $E = 110$ ГПа;
- Межа міцності: $\sigma = 1170$ МПа;
- Межа плинності: $\sigma_T = 750$ МПа;
- Межа пружності: $\sigma_y = 65$ МПа;
- Відносні подовження: $= 14\%$;

- Температурний коефіцієнт модуля пружності: $\epsilon = - 3 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$;
- Коефіцієнти лінійного розширення: $= 28,8 \times 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$;
- Щільність матеріалу: $\rho = 7.9 \text{ г/см}^3$

2) Кріплення мембрани буде проводитися за дві грані, так як кріпиться мембрана до кожуха за допомогою ручного дугового зварювання;

3) Вибір зовнішнього навантаження, саме тиск 0-100 МПа.

4) Створення сітки з урахуванням кривизни. Даний етап необхідний для того, щоб переконатися, що деталі відсутні розриви (Рисунок 3.2).

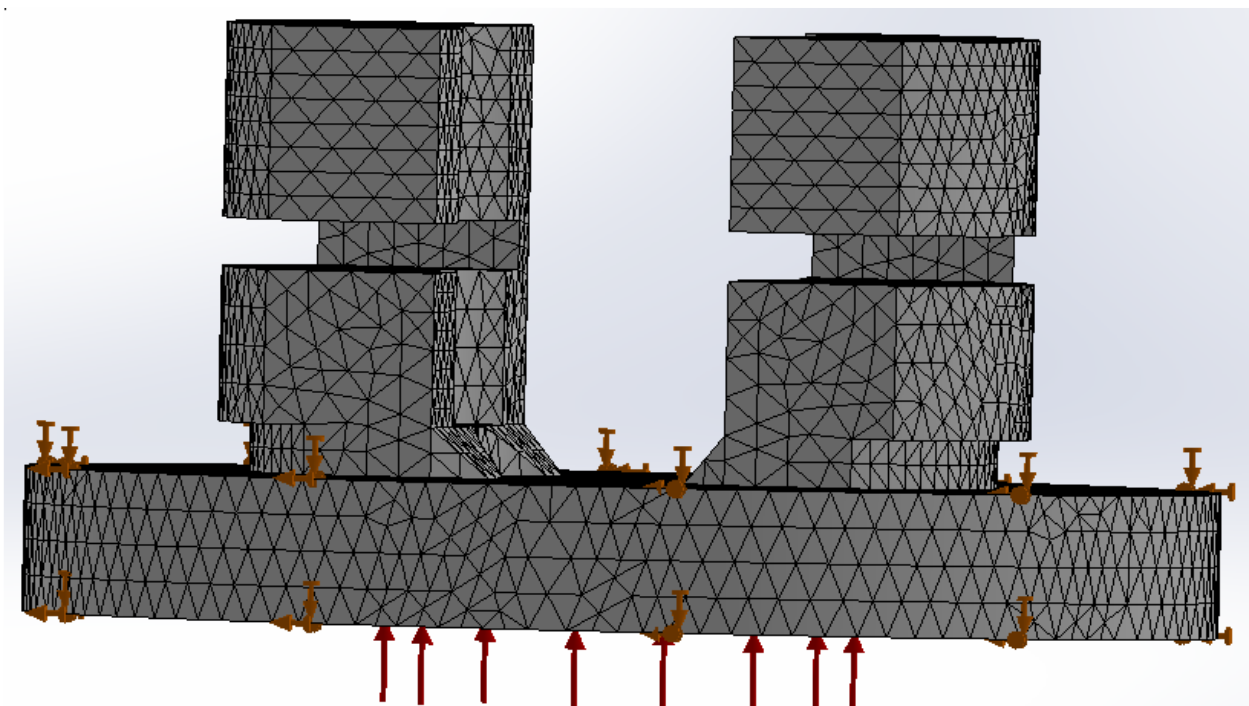


Рисунок 3.2 – Сітка на основі кривизни

При моделюванні мембрани з подачею тиску менше 1 МПа, прогину мембрани практично не було, значення були дуже малі, дане явище сталося через те, що товщина мембрани досить велика.

Виконаємо розрахунки переміщення жорсткого центру мембрани при тиску 1 МПа, підставивши значення. Розрахунки зробимо за допомогою програми MathCad.

Mathcad - [маткад для мембран]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные опер.

$P_{\max} := 100$ –мак давление
 $\sigma_{\text{пред}} := 1170$ –предел кратковременной прочности
 $\mu := 0.3$ –коэффициент Пуассона
 $E := 110000$ –модуль упругости

$R0 := 12$ –радиус мембраны
 $P := 1$ –подаваемое давление
 $r := 0.4 \cdot R0 = 4.8$ –радиус жесткого центра

Given

$$h := \sqrt{\frac{P_{\max}}{1.5 \cdot \sigma_{\text{пред}}}} R0 = 2.864 \quad c := \frac{R0}{r} = 2.5$$

$$A_p := \frac{[3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (c^4 - 1 - 4 \cdot c^2 \cdot \ln(c))]}{16 \cdot c^4} = 0.066$$

$$E := \left[\frac{3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (c^4 - 1 - 4 \cdot c^2 \cdot \ln(c))}{16 \cdot c^4} \right] \left[\frac{(P \cdot R0^4)}{\left(\sqrt{\frac{P_{\max}}{1.5 \cdot \sigma_{\text{пред}}}} R0 \right)^3 \cdot E} \right] = 5.309 \times 10^{-4}$$

Далі, підставивши всі значення, зробимо моделювання у програмі SolidWorks Simulation, для отримання точніших значень, оскільки при моделюванні використовується реальна конструкція (Рисунок 3.3).

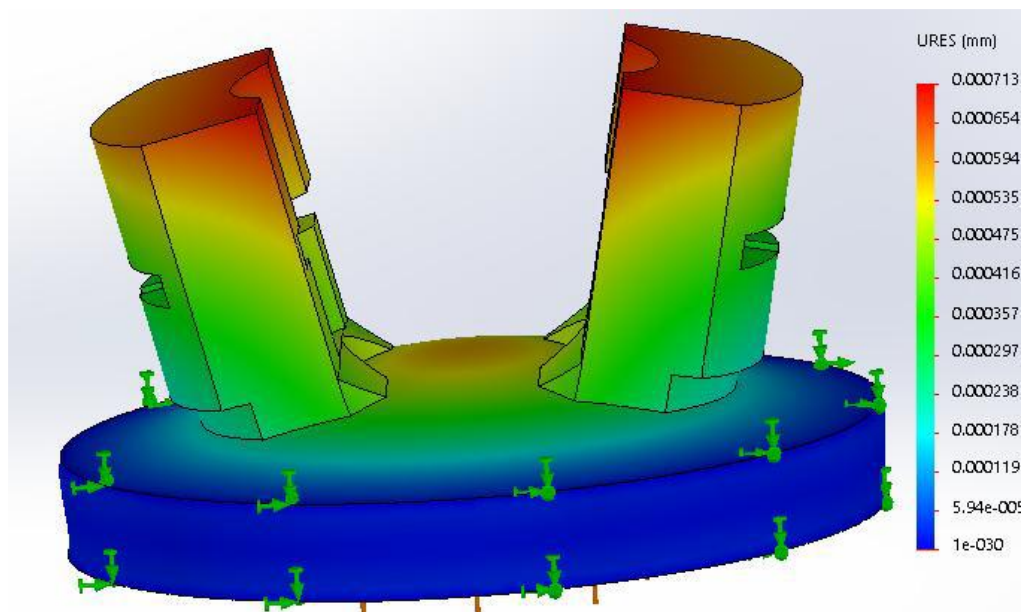


Рисунок 3.3 – Прогин мембрани під впливом тиску 1 МПа

Проаналізувавши отримані значення, видно, що з моделюванні максимальний прогин центру мембрани дорівнює $\varepsilon = 5.370 \times 10^{-4}$ мм.

Визначимо відносну похибку одержаних результатів:

$$\Delta f_1 = \frac{(5.370 - 5.309) \cdot 10^{-4}}{5.309 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\% = 1.1\%$$

Відносна похибка становить 1.1%, що відповідає вимогам ТЗ і не перевищує 2%, отже, моделювання виконано, правильно.

При проведенні моделювання переміщення центру мембрани під дією тиску менше 1 МПа прогину практично не було, і отримані значення були незначні.

Зробимо такі самі розрахунки при тиску 100 МПа. Виконаємо розрахунки у програмі MathCad.

Mathcad - [маткад для мембран]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные опе

$P_{\max} := 100$ —мак давление
 $\sigma_{\text{пред}} := 1170$ —предел кратковременной прочности
 $\mu := 0.3$ —коэффициент Пуассона
 $E := 110000$ —модуль упругости
 $R_0 := 12$ —радиус мембраны
 $P := 100$ —подаваемое давление
 $r := 0.4 \cdot R_0 = 4.8$ —радиус жесткого центра

Given

$$h := \sqrt{\frac{P_{\max}}{1.5 \cdot \sigma_{\text{пред}}}} R_0 = 2.864 \quad c_{\text{кр}} := \frac{R_0}{r} = 2.5$$

$$A_p := \frac{[3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (c^4 - 1 - 4 \cdot c^2 \cdot \ln(c))]}{16 \cdot c^4} = 0.066$$

$$E := \left[\frac{[3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (c^4 - 1 - 4 \cdot c^2 \cdot \ln(c))]}{16 \cdot c^4} \right] \cdot \left[\frac{(P \cdot R_0^4)}{\left(\left(\frac{P_{\max}}{1.5 \cdot \sigma_{\text{пред}}} \right)^3 \cdot R_0 \right) \cdot E} \right] = 0.053$$

З розрахунків видно, що максимальний прогин центру мембрани при тиску 100 МПа дорівнює $\varepsilon = 0.053$ мм.

Зробимо моделювання в SolidWorks (Рисунок 3.4).

Проаналізувавши отримані значення, видно, що при моделюванні максимальний прогин центру мембрани дорівнює $\epsilon = 0.053$ мм

Визначимо відносну похибку одержаних результатів:

Відносна похибка становить 1.5%, що відповідає вимогам ТЗ і не перевищує 2%, отже, моделювання виконано, правильно.

Зробимо розрахунок чутливості мембрани, під чутливістю розуміють відношення переміщення в напрямку діючого навантаження:

Розглянемо напругу, що діє мембрану при тиску 100 МПа.

На відміну від компонентів напруги, напруга von Mises не має напрямку, вона буде повністю визначатися величиною, вираженою в одиницях напруги. Ця напруга використовується критерієм відмови для оцінки відмови пластичних матеріалів.

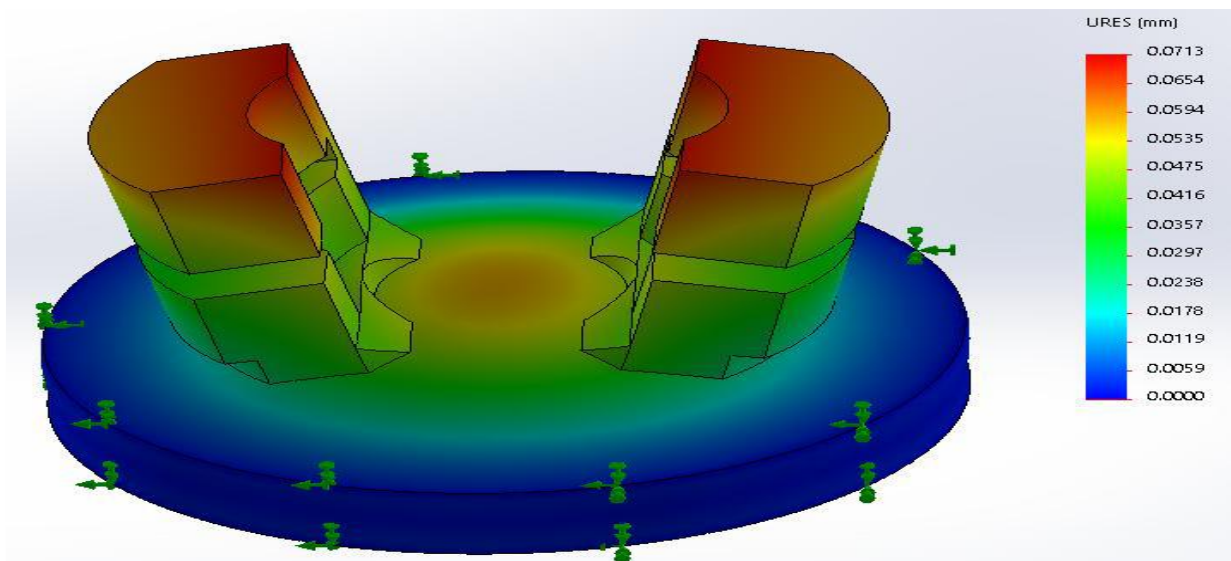


Рисунок 3.4 – Прогин мембрани під впливом тиску 100 МПа

Напруга von Mises обчислюється на основі трьох головних напруг:

$$VON = \{0.5 \cdot [(P1 - P2)^2 + (P1 - P3)^2 + (P2 - P3)^2]\}^{1/2}$$

Моделювання напруги при максимальному тиску представлено на Рисунок 3.5.

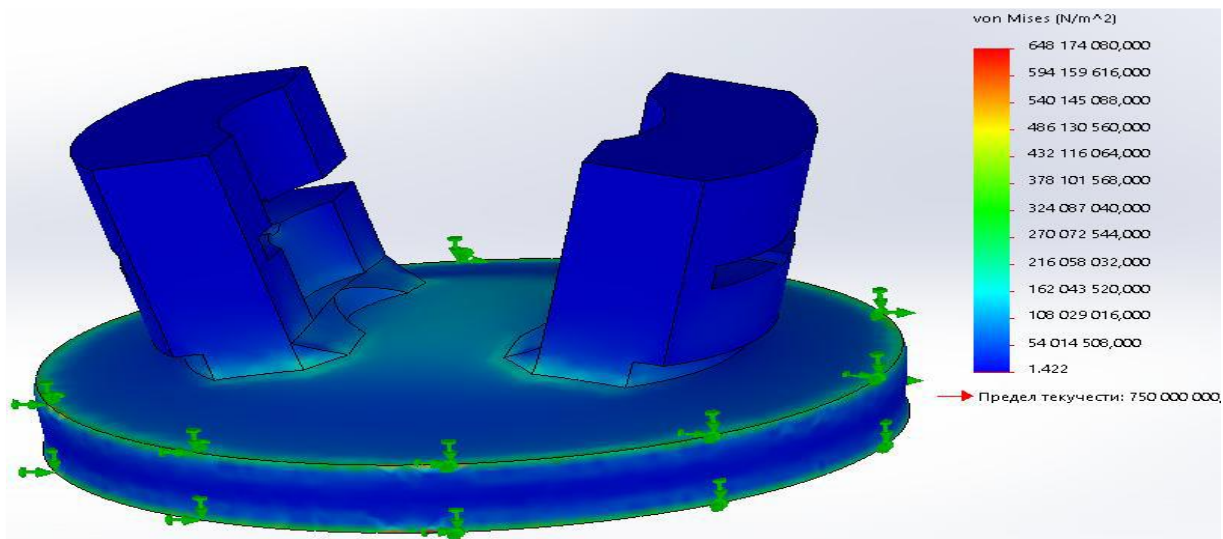


Рисунок 3.5 – Моделювання результатів напруги мембрани при максимальному тиску

Проаналізувавши отримане значення, можна дійти невтішного висновку, що найбільше напруга мембрани досягається на місцях кріплення мембрани до корпусу [13].

Також, виходячи з отриманих результатів, можна розрахувати коефіцієнт запасу міцності при максимальному тиску, що впливає на мембрану:

$$n = \frac{750 \cdot 10^6}{648 \cdot 10^6} = 1.16$$

3.3 Розрахунок параметрів оптичного волокна

Після того, як було здійснено розрахунок мембрани, а також розглянуто зміни її прогинів в результаті моделювання, необхідно провести розрахунок

параметрів оптичного волокна. І потім досліджувати деформацію волокна в результаті переміщення стояків у протилежні, відносно один одного стояків. Загальний вид досліджуваного складання представлений на рисунку 3.6.

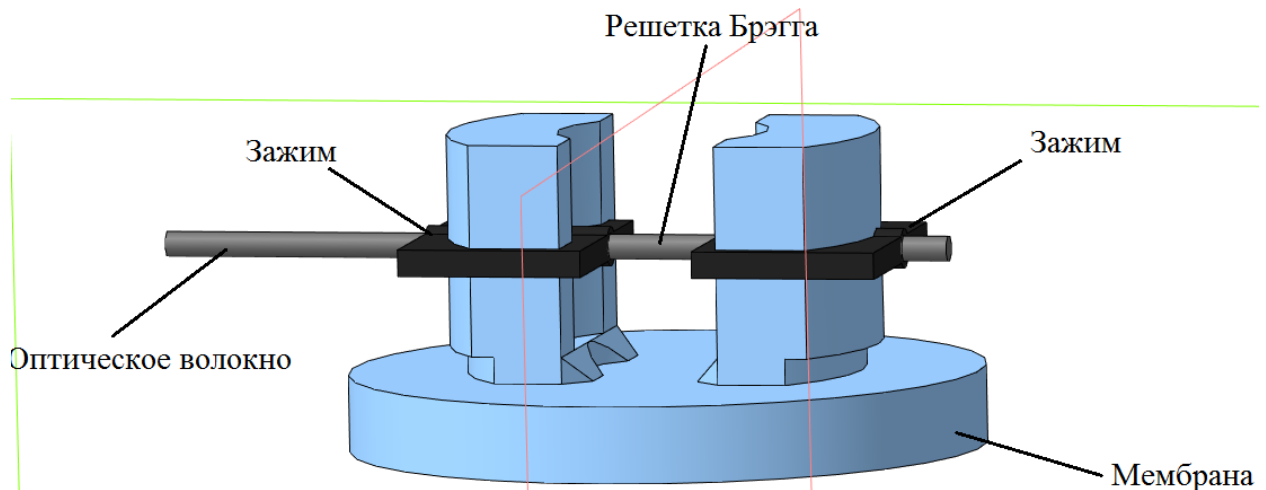


Рисунок 3.6 – Загальний вид досліджуваного складання

Бреггівські ґрати пов'язують основну моду волоконного світловоду, яка поширюється у прямому напрямку по волоконному світловоду, з іншою модою, яка поширюється в протилежному напрямку, на резонансній довжині хвилі λ_{Br} визначається вона співвідношенням:

$$\lambda_{Br} = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda,$$

де n_{eff} - ефективний показник заломлення серцевини волокна основної моди;
 Λ - період ґрат Брегга.

Спектральна властивість, досить важлива характеристика ґрат Брегга. Однією з цих властивостей є спектральне положення резонансу, а також його ширина та коефіцієнт відображення в максимумі. За допомогою теорії пов'язаних мод можна виразити функцію коефіцієнта відображення решітки Брегга від довжини хвилі:

$$r = \frac{sh^2 \cdot (\gamma_B L)}{ch^2(\gamma_B L) - \frac{\sigma^2}{k^2}},$$

де $\gamma_B = \sqrt{k^2 - \sigma^2}$.

Спектральна відбудова від суворого резонансу σ визначається різницею

основної моди $\beta = \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda}$:

$$\sigma(z) = \beta(z) - \beta_{Br}(z) = \frac{2\pi \cdot n_{eff}(z)}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda(z)},$$

де $n_{eff}(z) = n_{eff} + \eta \cdot \Delta n_a(z)$ – локальний ефективний показник заломлення.

Коефіцієнт зв'язку ґрати $k(z)$ на довжині хвилі λ пропорційний амплітуді модуляцій наведеного показника заломлення $\Delta n_{mod}(z)$:

$$k(z) = \frac{\pi \eta \cdot \Delta n_{mod}(z)}{\lambda},$$

де η - частка потужності основної моди, що поширюється у середині світловода.

Даним співвідношенням може бути виражена спектральна ширина резонансу на піввисоті бреггівських ґрат:

$$\Delta\lambda_{0.5} = 2\lambda\alpha \sqrt{\left(\frac{\eta\Delta n}{2n_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{L}\right)^2},$$

де α – параметр порядку одиниці для глибоких ґрат з коефіцієнтом відображення 1, і порядку 0.5 для ґрат невеликої глибини.

Для решітки з дев'ятицю показника заломлення $\Delta n=10^{-4}$ та з періодом модуляції $\Lambda=67.06$ мкм, спектр відображення світлового сигналу представлений на рисунку 3.7.

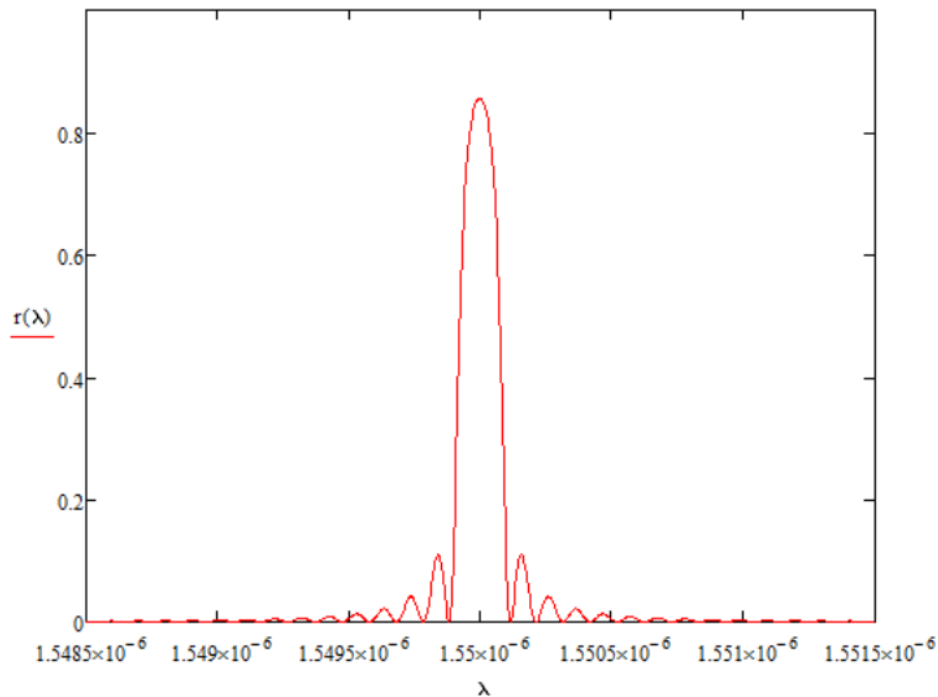


Рисунок 3.7 – Спектр відбитого сигналу

Зміна зсуву центральної довжини хвилі через механічну дію, а саме від деформації, визначається, як:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right),$$

де n_{eff} – ефективний показник заломлення;

Λ - період решітки.

Також залежність зсуву центральної хвилі відбитого випромінювання через деформацію може бути представлена в наступному вигляді:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e) \cdot \delta_z,$$

де p_e - константа деформації оптичного волокна

Константа p_e розраховується і визначається з виразу:

$$p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})),$$

де p_{11} та p_{12} - коефіцієнти Покельса у тензорі оптичних напруг;
 ν -коефіцієнт Пуассона.

Для типового волокна ці значення дорівнюватимуть:

$$p_{11}=0,0113;$$

$$p_{12}=0,252;$$

$$\nu=0,2;$$

$$n_{\text{eff}}=1,4447.$$

Виходячи зі значень, чутливість для довжини хвилі $\lambda_B = 1550$ нм складе 1,3 нм [14-15].

При розтягуванні оптоволокна змінюється довжина решітки Брегга, та період модуляції показника заломлення, а також відбувається зміна показника заломлення серцевини та оболонки оптоволокна.

Вираз для зміни показника заломлення через розтягування визначається фотопружним ефектом так, що:

$$\Delta n_{\delta} = -\frac{1}{2} n_{eff}^3 \cdot p_e \cdot \delta_z,$$

це пов'язано з анізотропією оптичного волокна, що виникає при розтягуванні.

3.4 Моделювання мембрани з жорсткозакріпленим оптичним волокном

Далі буде проведено моделювання мембрани з жорсткозакріпленим у затискачах оптоволоконном, і розглянуто деформацію мембрани, а отже і оптоволоконна при різних тисках.

Етапи проведення моделювання складання:

1) Вибір матеріалу, так як у складанні використовуються 4 деталі, то необхідно для кожної з них задати потрібний матеріал, матеріал мембрани було розглянуто раніше;

Властивості матеріалу для оптичного волокна:

- Модуль пружності: $E = 68\,900 \text{ Н/мм}^2$;
- Коефіцієнт Пуассон: $\mu = 0.2$;
- Модуль зсуву: $G = 28\,000 \text{ Н/мм}^2$;
- Показник заломлення: $n = 1.5$;
- Масова густина: $\rho = 2480 \text{ кг/м}^3$.

Як матеріал для затискачів використовується легована сталь, так як основна роль затискачів полягає в тому, щоб оптичне волокно було в них жорстко закріплено.

Властивості цієї сталі представлені нижче:

- Модуль пружності: $E = 210\,000 \text{ Н/мм}^2$;
- Коефіцієнт Пуассон: $\mu = 0.28$;
- Модуль зсуву: $G = 79\,000 \text{ Н/мм}^2$;
- Масова густина: $\rho = 7\,700 \text{ кг/м}^3$;
- Межа міцності: $\sigma = 724 \text{ Н/мм}^2$;
- Межа плинності: $\sigma_T = 620.5 \text{ Н/мм}^2$
- Коефіцієнт теплового розширення: $= 1.3 \text{ К}^{-1}$;
- Теплопровідність: $\Lambda = 50 \text{ W/м}\cdot\text{К}$. [16]

2) Кріплення мембрани буде проводитися за дві грані, так як кріпиться мембрана до кожуха за допомогою ручного дугового зварювання;

3) Вибір навантаження, саме тиску 0-100 МПа залишається незмінним, щоб одержати більш докладного графіка, дослідження деформації оптоволокна відбуватиметься за трьох різних тисках;

4) Створення сітки на основі кривизни, потрібно для того, щоб переконатися, що в складання відсутні розриви, і всі деталі між собою пов'язані (Рисунок 3.8).

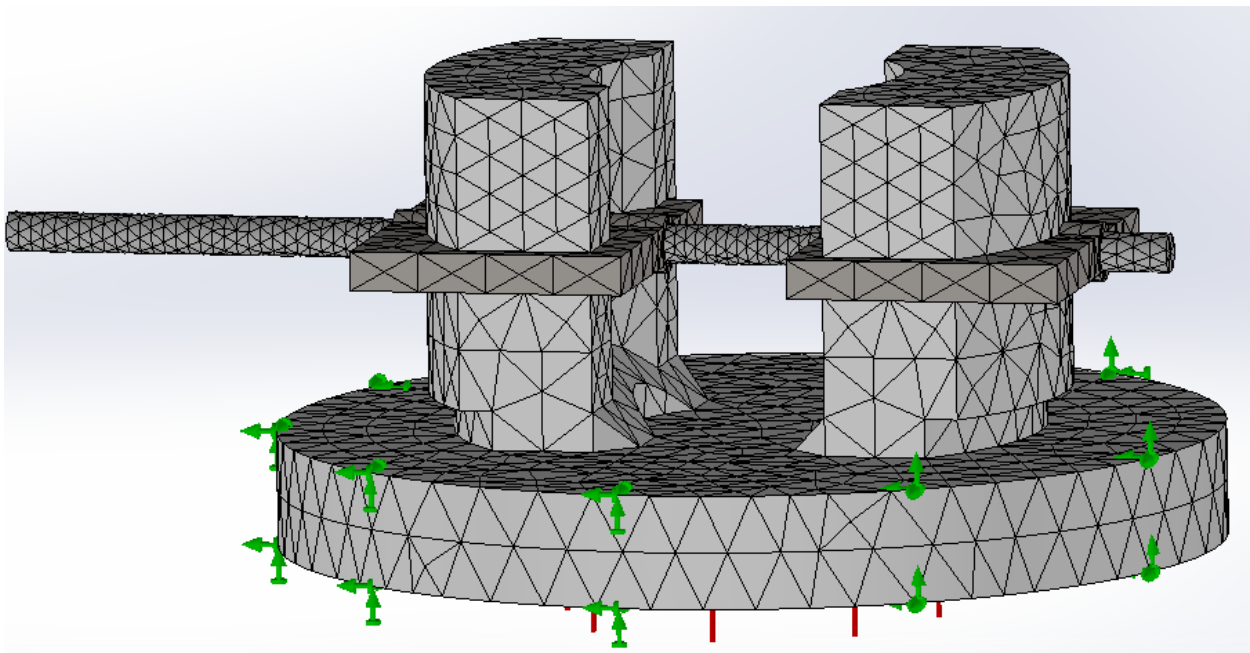


Рисунок 3.8 – Сітка на основі кривизни

При проведенні дослідження моделювання однієї мембрани було виявлено, що при подачі тиску менше 1 МПа деформація мембрани буде незначною, отже, при моделюванні складання мембрани з оптоволоконном подача тиску здійснюватиметься від 1 МПа.

Для початку дослідження подамо тиск 1 МПа, і перевіримо мембрану на прогин, з урахуванням жорсткозакріпленого оптоволоконна (Рисунок 3.9).

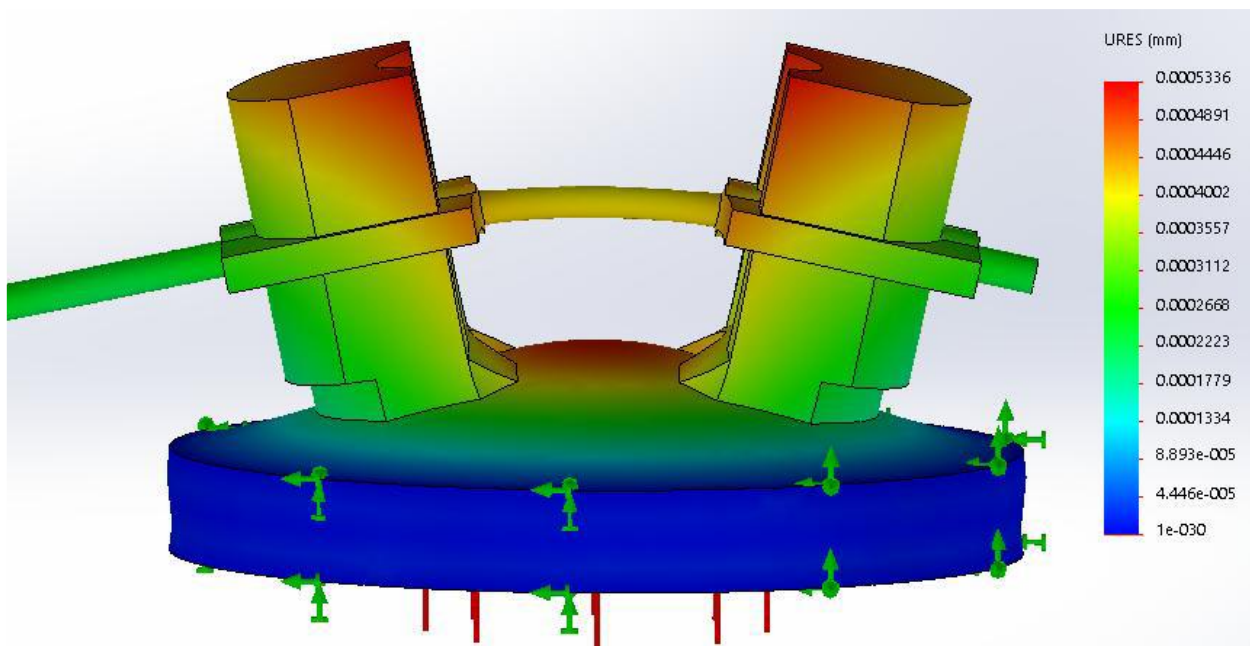


Рисунок 3.9 – Моделювання мембрани з жорсткозакріпленням оптоволоконном під дією тиску 1 МПа

У формулі було розраховано максимальний центр переміщення мембрани при дії тиску 1 МПа, який дорівнює $\epsilon = 5.309 \times 10^{-4}$ мм.

Визначимо відносну похибку одержаних результатів:

$$\Delta f1 = \frac{(5.336 - 5.309) \cdot 10^{-4}}{5.309 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\% = 0.5\%$$

Також досліджуємо моделювання складання на прогин мембрани з урахуванням жорсткозакріпленого волокна при дії тиску 100 МПа (Рисунок 3.10), який виходячи з формули (2.4) дорівнює $\varepsilon = 0.0538$ мм.

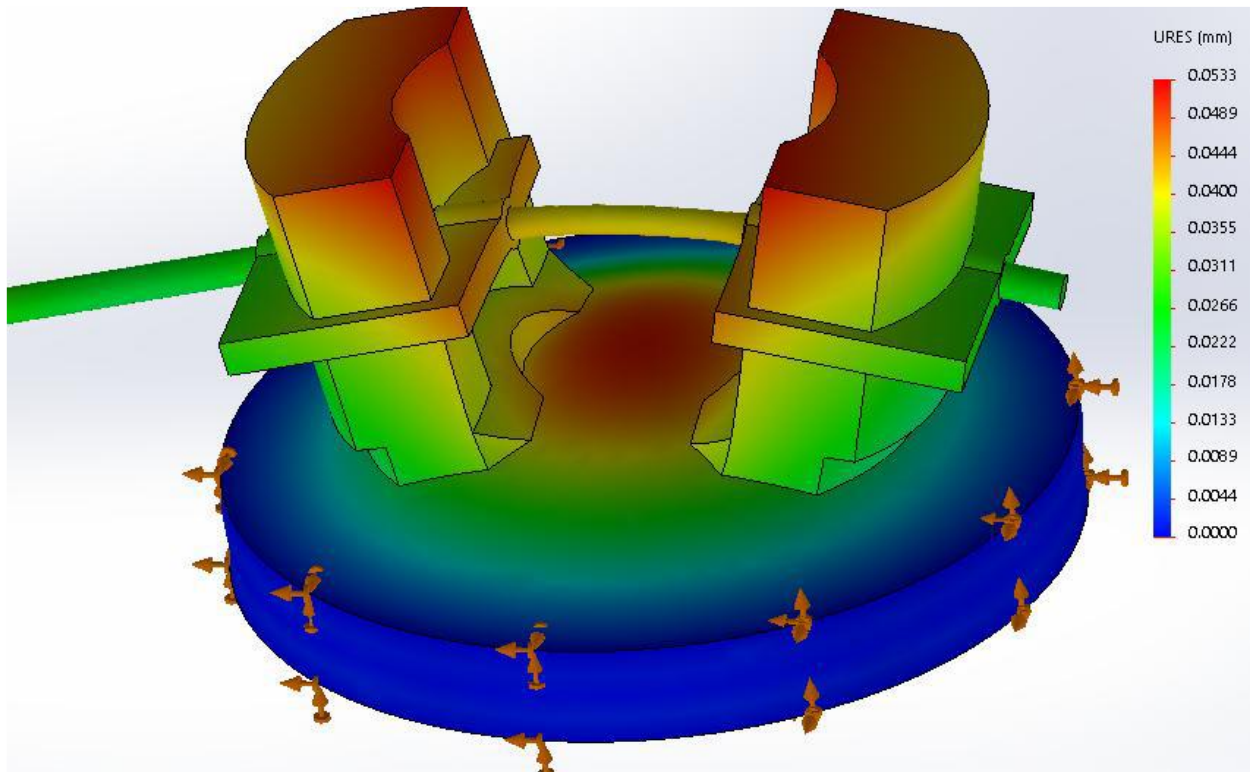


Рисунок 3.10 - Моделювання мембрани з жорсткозакріпленим оптоволоконном під дією тиску 100 МПа

Визначимо відносну похибку одержаних результатів:

$$\Delta f2 = \frac{0.0533 - 0.053}{0.053} \cdot 100\% = 0.9\%$$

В результаті моделювання була проведена перевірка результатів прогину мембрани з урахуванням жорсткозакріпленого в затискачі оптичного волокна, і пораховано відносну похибку отриманих результатів з раніше розрахованими значеннями. У результаті виконаних дій можна дійти невтішного висновку, що

результати похибки зменшилися, отже моделювання мембрани з оптоволоконном найточніше.

3.5 Моделювання деформації оптичного волокна

Для дослідження деформації оптоволоконна необхідно провести моделювання при різних тисках, щоб побудувати графік, який відобразить зміну довжини хвилі в залежності від значення отриманої деформації. Провівши даний етап, можна буде розрахувати чутливість датчика до отриманої верхньої межі вимірювання бреггівської довжини хвилі.

Розглянемо деформацію оптичного волокна під час подачі тиску 10 МПа (Рисунок 3.11).

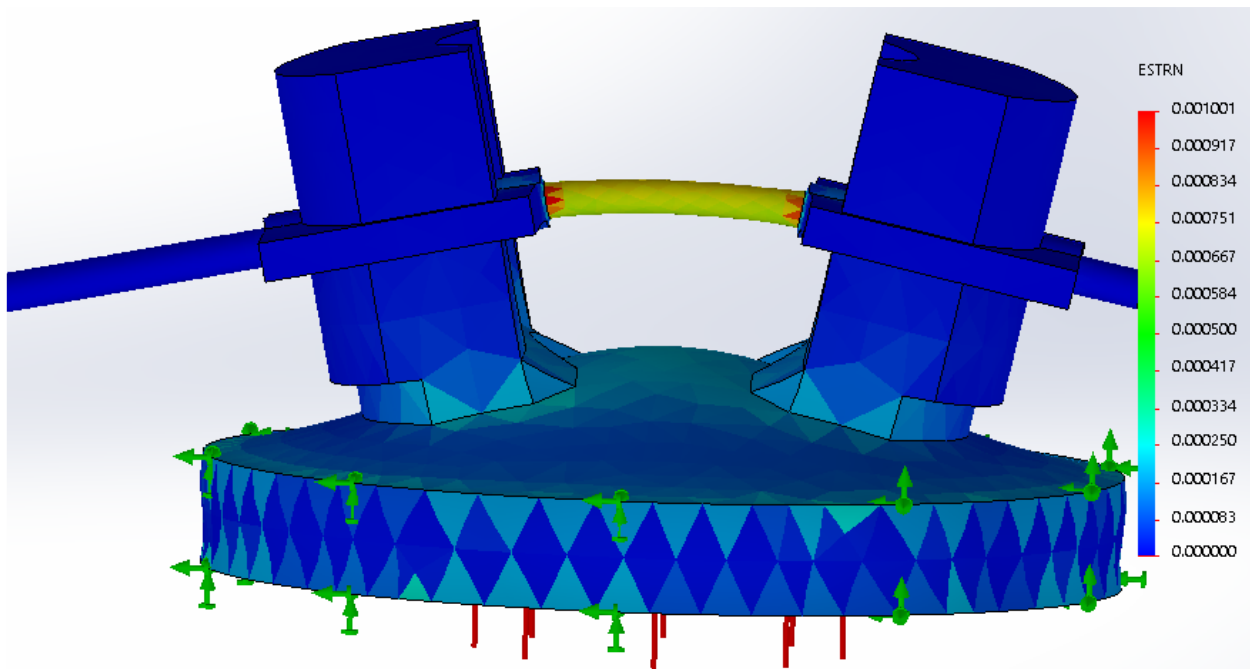


Рисунок 3.11 - Деформація оптичного волокна під впливом тиску 10 МПа

Деформація волокна при 10 МПа на ділянці з ґратами Брегга $\delta=0,00075$.

Далі подамо тиск 50 МПа, результат моделювання представлений на рисунку 3.12.

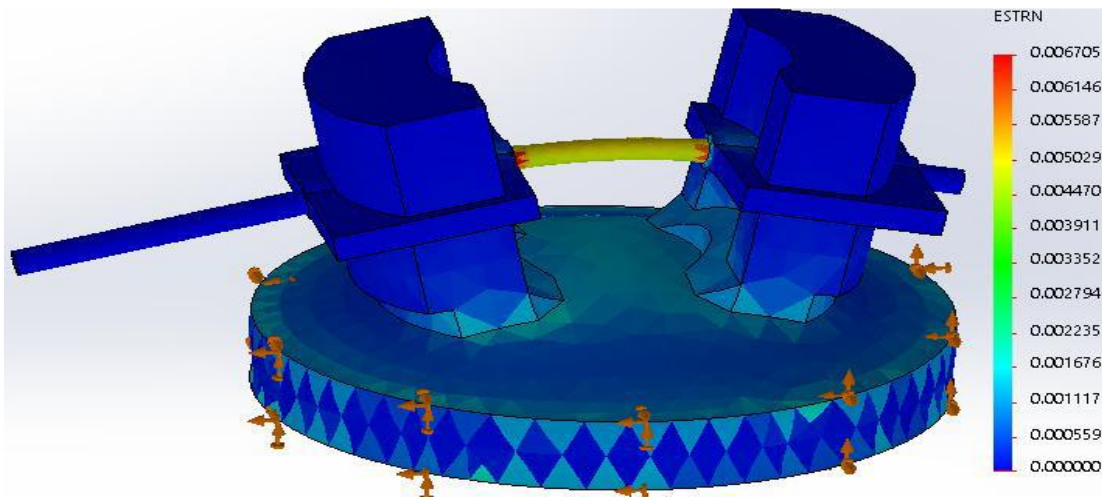


Рисунок 3.12 – Деформація оптоволокна під дією тиску 50 МПа

Деформація волокна при 50 МПа на ділянці з ґратами Брегга дорівнює $\delta=0,005$.

Також подамо максимальний допустимий тиск 100 МПа, результат моделювання представлений на рисунку 3.13.

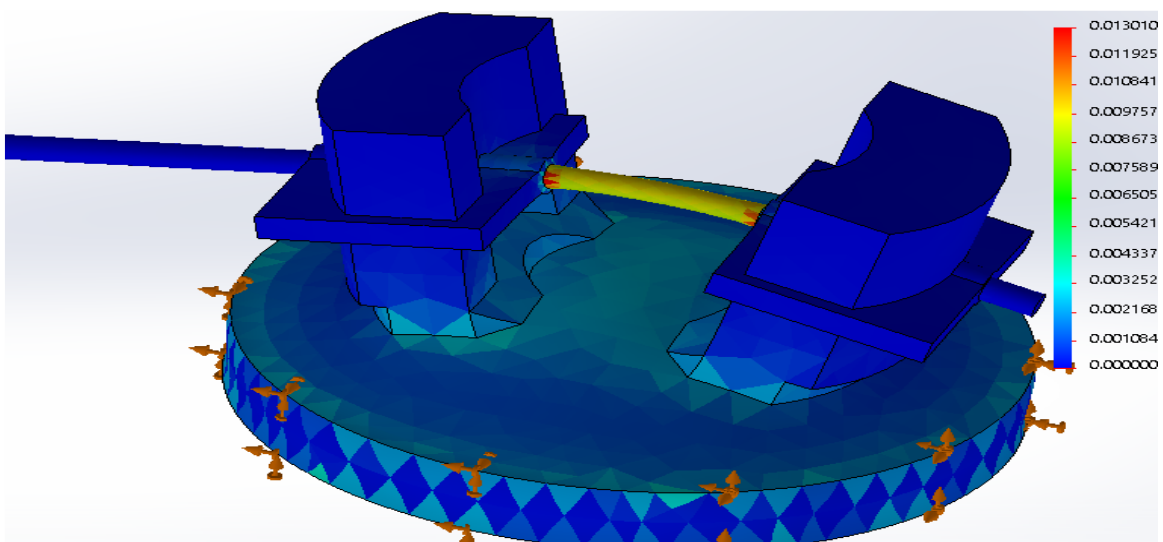


Рисунок 3.13 – Деформація оптоволокна під впливом тиску 100 МПа

Деформація оптоволокна при 100 МПа, ділянки з ґратами Брегга дорівнює $\delta=0,01$.

Розрахувавши деформацію оптоволокна, на вигині якої знаходиться бреггівська решітка, можна побудувати графік, що виражає залежність зміни довжини хвилі в бреггівській решітці від деформації (Рисунок 3.14).

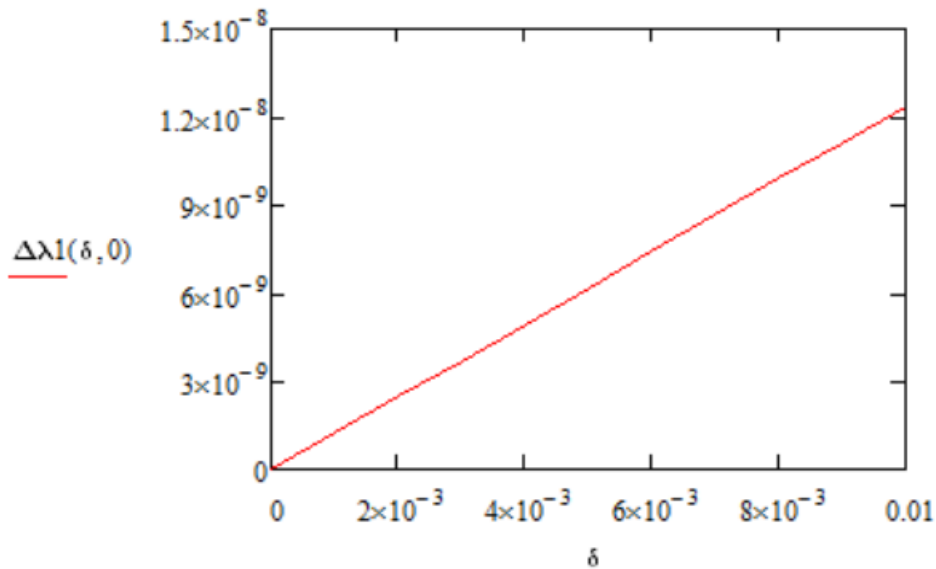


Рисунок 3.14 – Графік залежності зміни довжини хвилі у бреггівських ґратах від деформації

Так як при максимальному впливі на оптоволокно його деформація склала $\delta=0,01$, то на графіку можна побачити, що зміна довжини хвилі від вихідного значення при такій деформації склала $1.3 \cdot 10^{-8}$.

Вихідне значення довжини хвилі було розраховане раніше і становило 1550 нм, відповідно при максимальній деформації довжина хвилі становитиме 1563 нм.

Проаналізувавши отримані значення, можна сказати, що діапазон бреггівських довжин хвиль становить 1550-1563 нм. Таким чином, виходячи з формул (2.5) і (2.6) можна розрахувати чутливість для отриманої максимальної

довжини хвилі $\lambda_B = 1563$ нм становитиме 1,8 нм. Отже, чутливість датчика тиску склала 1.3-1.8 нм в діапазоні бреггівських довжин хвиль 1550-1563 нм.

3.6 Висновок до розділу 3

Виходячи з технічних характеристик та правильно підібраного матеріалу мембрани, було розраховано параметри мембрани, виходячи з яких проведено моделювання. Моделювання мембрани на прогин відбувалося при двох різних тисках і отримані значення були порівняні з теоретичними розрахунками.

При максимальному тиску був проведений розрахунок коефіцієнта запасу міцності, який дорівнює $1.16 > 1$, що задовольняє умову міцності, а значить, мембрана витримає максимальний тиск, що впливає. Також був здійснений розрахунок характеристик оптичного волокна, а саме властивостей бреггівської решітки, так як знаходиться решітка Брегга на згині оптоволокна, відповідно деформація оптичного волокна пропорційна до зміни довжини хвилі світла в решітці Брегга від впливу тиску.

Потім було проведено моделювання в SolidWorks Simulation, мембрани з оптоволокном, яке було жорстко закріплено затискачами, була порахована відносна похибка між розрахованими значеннями Mathcad і отриманими при моделюванні, похибка склала менше 2%, що задовольняє вимогам технічного завдання. Далі була розглянута деформація оптичного волокна при трьох різних впливових тисках, це необхідно для побудови точнішого графіка, який відображає залежність зміни довжини хвилі в бреггівських ґратах від деформації оптоволокна, виходячи з графіка, був отриманий діапазон бреггівських довжин хвиль, який склав 1550-1563 нм, а чутливість датчика склала 1.3-1.8 нм.

4 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ВОЛОКОННО – ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА ТИСКУ

4.1 Конструкція волоконно – оптичного датчика тиску

Конструкція волоконно-оптичного датчика тиску, чутливим елементом якого є брегівська решітка, представлена на рисунку 4.1.

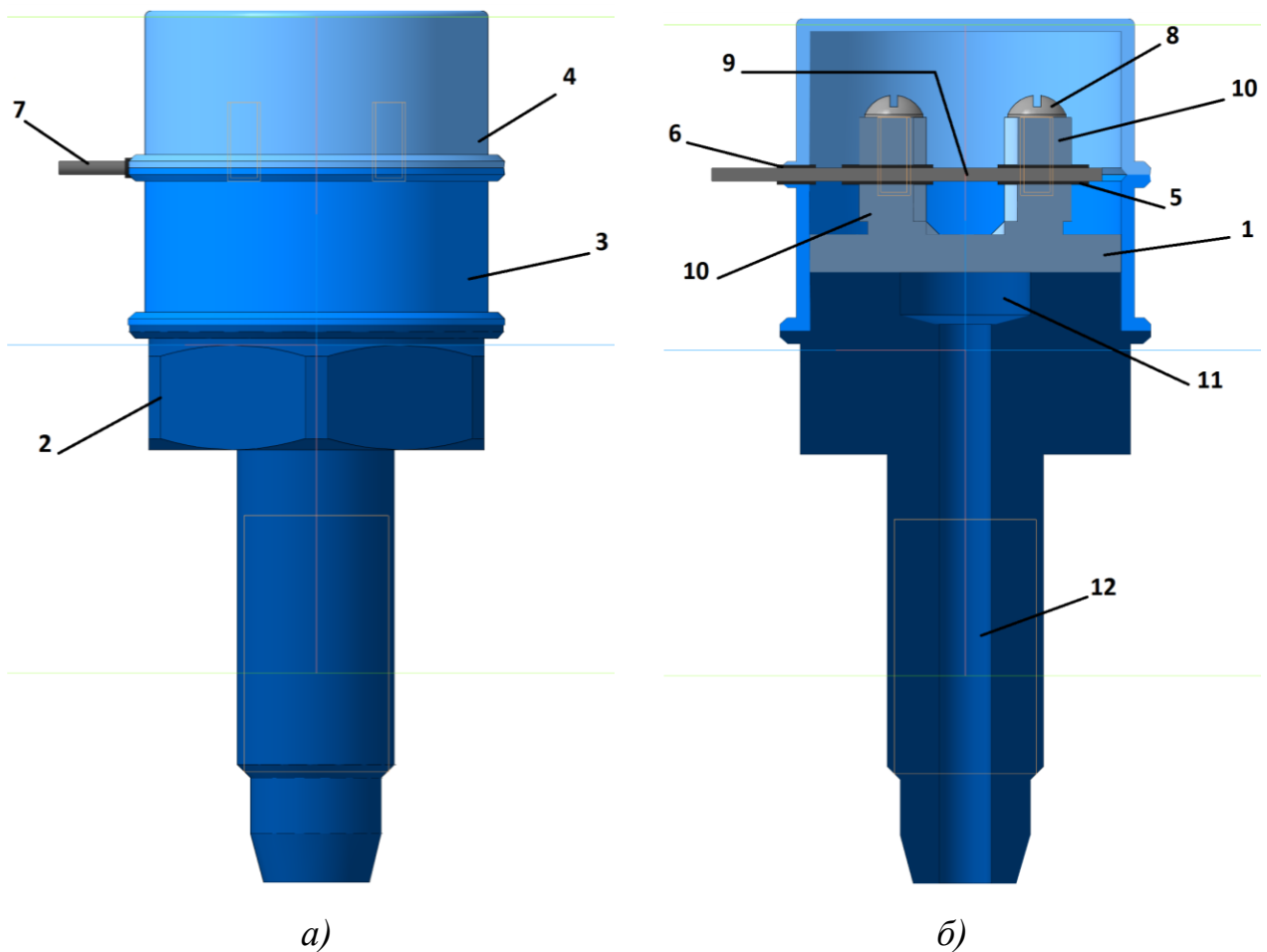


Рисунок 4.1 – Конструкція волоконно-оптичного датчика тиску

а) - загальний вигляд; б) - вид у розрізі;

Волоконно-оптичний датчик складається з корпусу 2, виконаний у вигляді різьбового штуцера. У корпусі знаходиться провідний канал 12 для переміщення

вимірюваного середовища, яка потрапляє в приймальну порожнину 11. Дана порожнина закінчується мембраною 1, яка виконана з високоякісної пружинної сталі 36 НХТЮ, яка, у свою чергу, має хороші пружні властивості. На звороті мембрани розташовані дві стійки 10.

У стійок 10 присутні отвори, в яких жорстко закріплено оптичне волокно 7, всередині якого знаходиться бреггівська решітка 9, вона є чутливим елементом волоконно - оптичного датчика тиску. Оптичне волокно 7 закріплюється затискачами 5 через клейовий композит і за допомогою двох гвинтів 8. Оптичне волокно 7 розташоване з можливістю послідовного з'єднання датчиків в розподілену мережу. Корпус 2, кожух 3, а також кришка 4 утворює опорну порожнину.

Принцип роботи волоконно-оптичного датчика, чутливим елементом якого є бреггівська решітка:

Вимірюваний тиск через провідний канал 12, який знаходиться в корпусі 2, надходить у приймальну порожнину 11. Під впливом тиску мембрана 1 починає прогинатися, через що відбувається переміщення в протилежні один від одного боку стійки 10. Так як у стійках 10 жорстко закріплено оптичне волокно 7, то переміщення стійок призводить до деформації оптичного волокна 7, виходячи з цього, відбувається зміна відбитої довжини хвилі світла в бреггівській решітці 9. По зміні відбитої довжини хвилі світла буде визначатися величина тиску відносно опорної порожнини, яка складається з корпусу 2, кришки 4 та кожуха 3.

Також величина тиску в цій опорній порожнині варіюватиметься від вакууму до значення тиску, щодо якого буде необхідно реєструвати тиск.

4.2 Конструкція мембрани

На рисунку 4.2 зображено мембрану.

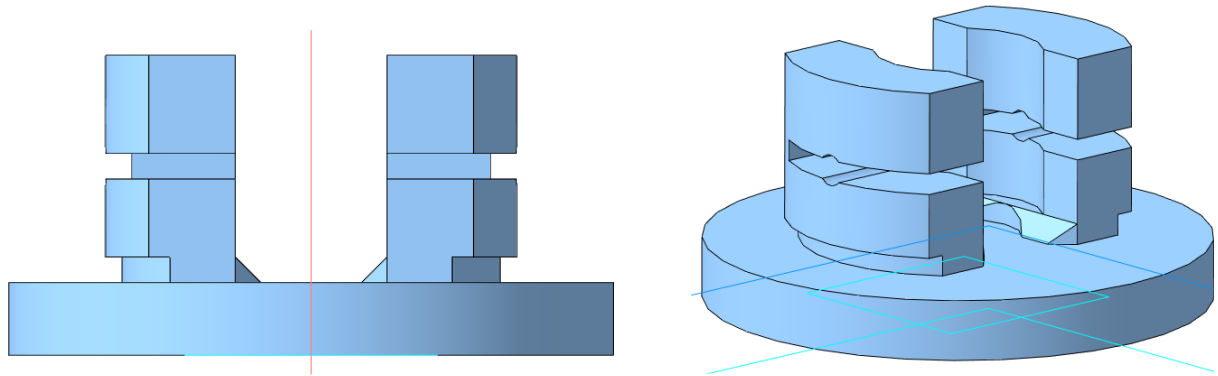


Рисунок 4.2 – Мембрана зі стійками

У конструкцію волоконно-оптичного датчика тиску було прийнято рішення внести зміни, а саме замість заглушки поставити мембрану. Таке рішення дозволить виготовляти датчики для широкого діапазону вимірювань з високою точністю, адже мембрана має високі метрологічні характеристики, що дозволяє підвищити багато фізичних характеристик об'єкта, що сприймає, такі як лінійність, чутливість.

Мембрана та стійки виконані з однієї заготовки в єдиному технологічному процесі, таке рішення суттєво спрощує серійне виробництво волоконно-оптичних датчиків тиску. На стійках розташовуються два отвори, в яких за допомогою затискачів кріпиться оптичне волокно.

Так як мембрана є досить пружним елементом, при виборі матеріалу потрібно враховувати всі властивості.

Матеріал визначає багато характеристик пружного елемента: міцнісні, масові та точнісні характеристики чутливості та швидкодії. Тому як матеріал, який використовується при виготовленні пружних елементів, застосовують прецизійні та високоякісні матеріали: високоякісні сталі та бронзи, які мають високі межі міцності, плинності, пружності та малі величини пружних недосконалостей.

Розроблений датчик призначений для вимірювання тиску в різних середовищах, і різних температурах, тому як матеріал пружного елемента візьмемо

сталь 36НХТЮ, що забезпечує поєднання високих метрологічних характеристик і підвищеної чутливості.

Цей сплав має хороші характеристики щодо корозійної та термічної стійкості і може застосовуватися у досить агресивних середовищах та при підвищених температурах. Сплав 36НХТЮ має також хороші пластичні властивості в холодному і гарячому стані, піддається штампуванню, зварюється аргонно-дуговим зварюванням.

4.3 Висновок по розділу 4

В даному розділі була розглянута конструкція та принцип роботи волоконно-оптичного датчика тиску за допомогою розробленої та побудованої 3D-моделі.

ВИСНОВКИ

На підставі технічного завдання прийнято рішення про внесення зміни до конструкції волоконно-оптичного датчика тиску, а саме замість заглушки, яка пропускає тиск, поставити мембрану. Поява мембрани сприяє підвищенню чутливості, лінійності та інших фізичних характеристик сприймаючого елемента, оскільки мембрана має найкращі метрологічні характеристики.

Було здійснено розрахунок розмірів мембрани з високою точністю, що дозволило оцінити механічні властивості мембрани. Після проведення розрахунків параметрів мембрани була побудована її 3D-модель у програмі SolidWorks, і потім проведено моделювання мембрани на прогин при двох впливах тиску 1 МПа і максимальному допустимому 100 МПа, внаслідок чого були отримані відносні похибки отриманих значень при моделюванні та теоретичних розрахунків, у програмі Mathcad. Відносна похибка склала 1.1% та 1.5%, що задовольняє вимогам технічного завдання, і не перевищує 2%. Також при максимальному тиску був проведений розрахунок коефіцієнта запасу міцності, який склав $1.16 > 1$, що задовольняє умову міцності, а значить, мембрана витримає максимальний тиск, що впливає, в 100 МПа.

Також проведено розрахунок характеристик оптичного волокна, а саме брегівських решіток, так як місце розташування решіток знаходиться на вигині оптичного волокна, відповідно отримана деформація оптичного волокна пропорційна зміні довжини хвилі в брегівських ґратах від впливу тиску.

Після розрахунків була виготовлена 3D-модель збірки, яка включала мембрану з жорсткозакріпленими затискачами оптичним волокном, потім було проведено моделювання отриманої збірки в SolidWorks Simulation. Дослідження відбувалося як у попередньому пункті, при таких же тисках 1 МПа та 100 МПа. Була порахована відносна похибка між розрахованими значеннями Mathcad і отриманими при моделюванні збірки, і склала 0.5 % і 0.9 %, отримана похибка при

моделюванні збірки зменшилася, а значить моделювання мембрани з жорсткозакріпленим оптоволоконном найбільш точніше, що задовольняє вимогам.

Після пройдених досліджень розглянута деформація оптичного волокна при трьох різних впливах тиску при 10, 50 і 100 МПа, це необхідно для побудови більш точного графіка, який відображає залежність зміни довжини хвилі в бреггівської решітки від деформації оптоволоконна. Виходячи з графіка, було отримано діапазон бреггівських довжин хвиль, який становив 1550-1563 нм, а чутливість датчика склала 1.3-1.8 нм при даному діапазоні довжин хвиль.

СПИСОК ВИКОРАСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Sze, S.M. *Semiconductor Sensors* / S.M. Sze. – New York: J. Wiley & sons – 1994. – P. 550.
- 2) Middelhoek, S. *Silicon Sensors* / S. Middelhoek, S.A. Audet. – Singapore: Academic press. – 1989. – P. 376.
- 3) Kuzmenko A.P. Monitoring the technical condition of dams of hydroelectric power plants with automated monitoring and earthquake registration system / A.P. Kuzmenko, D.B. Korolenko, E.P. Zolotukhin // *Journal of Energy and Power Engineering* – Vol. 8. – 2014. – P. 1468 -1474.
- 4) Kuzmenko A.P. Identification of natural oscillation modes for purposes of seismic assessment and monitoring of HPP dams / A P. Kuzmenko, S.V. Saburov // *Power Tech. Eng.* – Vol. 50. – Issue 2. – 2016 (July). – P. 152-163.
- 5) Atef M. High-speed photodiodes in 40 nm standard CMOS technology / M. Atef, A. Polzer, H. Zimmermann // *Sensors and Actuators A.* – Vol. 193. – 2013. – P.213– 219.
- 6) Dziuban J. A. Silicon optical pressure sensor / J. A. Dziuban, A. Gorecka-Drzazga, U. Lipowicz // *Sensors and Actuators A.* – Vol. 32. – 1992. – P. 628-631.
- 7) Peiner E. A micromachined vibration sensor based on the control of power transmitted between optical fibers/ E. Peiner, D.Scholz, A. Schlachetzki, P. Hauptmann // *Sensors and Actuators A.* – Vol. 65. – 1998. P. 23-29.
- 8) Hill, K.O Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication/ Hill, K.O.; Fujii, Y.; Johnson, D. C.; Kawasaki, B. S. // *Appl. Phys. Lett.* Vol. 32(10). – 1978. – P. 647.
- 9) Forc Photonics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://forc-photonics.ru/ru/sensor_systems/pressure%20sensors/1/135/
- 10) Gustafsson K. A fibre optic pressure sensor in silicon based on fluorescence decay/ K. Gustafsson, B. Hok // *Sensors and Actuators.* – 1989, Vol. 19(4). – P. 327-332.

- 11) Zheng W. High-sensitivity photoelectric pressure sensor based on a monolithic dual photodiode/ W. Zheng, N. Cao, J. Qian //Proc. SPIE 2894, Detectors, Focal Plane Arrays, and Applications. – 1996. – P. 26-33.
- 12) Sze S.M., Physics of Semiconductor Devices, 2nd edition / S.M. Sze. – M.: Mir. – 1984. – P. 398-417.
- 13) Tooley M. Electronic Circuits: Fundamentals and Applications. – Elsevier: Taylor and Francis, 2013. – 320 p.
- 14) Taiwan Semiconductor Manufacturing Company [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.tsmc.com>
- 15) United Microelectronics Corporation [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.umc.com
- 16) Niclass C. A 4 μ s integration time imager based on CMOS single photon avalanche diode technology / C. Niclass, et al. // Sensors And Actuators A-Physical. – 2006.
- 17) Niclass C. A single photon avalanche diode implemented in 130-nm CMOS technology / C. Niclass // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – Vol. 13. – 2007. – P. 863-869.
- 18) Stoppa D. A CMOS 3-D imager based on single photon avalanche diode / D. Stoppa, et al. // IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers. – 2007.
- 19) Faramarzpour N. Fully integrated single photon avalanche diode detector in standard CMOS 0.18- μ m technology / N. Faramarzpour, et al. // IEEE Transactions On Electron Devices. – Vol. 55. – 2008. – P. 760-767
- 20) Розорінов Г. М. Високошвидкісні волоконно – оптичні лінії зв'язку: навч. посіб./ Г. М. Розорінов , Д. О. Соловійов. – Київ: Ліра – К, 2007. – 198 с.
- 21) Осадчук В.С., Осадчук В.В. Волоконно-оптичні системи передачі. - Вінниця: ВНТУ, 2005. – 225 с.
- 22) Ордодворець Л.В. Основи оптоелектроніки: конспект лекцій. – Суми: Видво СумДУ, 2010.– 44 с.

- 23) Бобицький Я.В., Матвіїшин Г.Л. Лазерні технології: навчальний посібник. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 320 с.
- 24) Колесник Ю.І., Кіпенський Ю.І. Елементи та пристрої квантової електроніки: навч. посібник. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – 318 с.
- 25) Навчальний посібник «Квантова електроніка». Частина 1 / Л. М. Шмиррова, О. М. Бевза, Н. В. Слободян. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 98 с.
- 26) Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Однорець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
- 27) Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво ЛіраК, 2017. – 364 с.
- 28) Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с. 32
- 29) Стахів П.Г., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка елементна база електронних пристроїв. – Київ: Обереги, 2000. – 300 с.
- 30) Шликов В.В. Мікропроцесорна техніка: Практикум [Електронний ресурс / В.В. Шликов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 144 с.
- 31) Гончаренко О.М., Баранов О.О., Костян М.О., Лободюк О.С., Однорець Л.В. Оптоелектронні компоненти сучасних волоконнооптичних ліній зв'язку / Програма і матеріали Міжнародної науковотехнічної конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніки, електротехніка. ФЕЕ-2021». – 2021. – С. 65-66.
- 32) ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT)

33) ДСТУ EN IEC 61757-5-1:2022 Волоконно-оптичні датчики. Частина 5-1. Вимірювання нахилу. Датчики нахилу на основі волоконних ґрат Брегга (EN IEC 61757-5-1:2021, IDT; IEC 61757-5-1:2021, IDT)

34) ДСТУ 3711-98 Засоби вимірювань тиску. Терміни та визначення

35) ДСТУ EN IEC 62149-3:2022 Волоконно-оптичні активні компоненти та пристрої. Стандарти ефективності. Частина 3. Інтегровані модуляторні лазерні діодні передавачі для волоконно-оптичних систем передавання даних 40 Гбіт/с (EN IEC 62149-3:2020/AC:2021-03, IDT; IEC 621493:2020/COR1:2021, IDT). Поправка № 1:2022

36) ДСТУ EN 62150-1:2022 Волоконно-оптичні активні компоненти та пристрої. Процедури випробувань і вимірювань. Частина 1. Загальні положення та настанови (EN 62150-1:2005, IDT; IEC 62150-1:2005, IDT)

37) ДСТУ EN 61757-1-1:2022 Волоконно-оптичні датчики. Частина 1-1. Вимірювання деформації. Датчики деформації на основі волоконних ґрат Брегга (EN 61757-1-1:2017, IDT; IEC 61757-1-1:2016, IDT)

38) ДСТУ EN IEC 61757:2022 Волоконно-оптичні датчики. Загальні технічні умови (EN IEC 61757:2018, IDT; IEC 61757:2018, IDT)