

## КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 621.372.8

### АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ В БІОМЕДИЦИНІ

*С.В. Павлов, О.Д. Азаров, Р.В. Просоловський*

Анотація: В роботі представлений огляд та класифікація волоконно-оптичних сенсорів, які використовуються у біомедицині. Класифікація проведена по методиці тестування і представляє наступні типи: модуляція інтенсивності випромінювання, використання явища повного внутрішнього відбиття, методика згину оптичних волокон, методика спектрального тестування, методика інтерферометричного тестування, мультиплексація та розподілене тестування.

Аннотация: В работе представлен обзор и классификация волоконно-оптических сенсоров для использования в биомедицине. Классификация проведена по методике тестирования и представляет следующие типы: модуляция интенсивности излучения, использование эффекта полного внутреннего отражения, методика изгиба оптических волокон, методика спектрального тестирования, методика интерферометрического тестирования, мультиплексация и распределенное тестирование.

Annotation: In current publication overview and classification of fiber-optic sensors for biomedicine is presented. Classification is based on testing technique and represents the following types: modulation of intensity of illumination, full internal reflection effect, fiber bending technique, spectral testing, interferometric technique, multiplexing and distribution.

Ключові слова: Волоконна оптика, волоконно-оптичний сенсор, біомедицина, біотканнина, біомедичне дослідження, волоконно-оптичний датчик

#### Вступ

Більшість сучасних неінвазивних діагностичних та лікувальних пристроїв у якості базової методики проведення тестування і замірювання вимірюваної величини використовують оптичне випромінювання як носій інформації. Найбільша проблема у таких пристроїв полягає у їх габаритних розмірах та ускладненню конструкції за рахунок використання оптичних систем для фокусування, введення, збору, виведення та подачі на оптико-електронні перетворювачі сигналів. Такі оптичні системи ускладнюють, а інколи і роблять неможливим проводити вимірювання у таких місцях як ротова порожнина, вушні раковини тощо. Для цього можуть бути вживані різноманітні оптичні волокна, які можуть відігравати функцію транспортування оптичного сигналу, функцію безпосереднього замірювання, а також їх поєднання.

**Мета роботи** – проаналізувати, зробити класифікацію волоконно-оптичних сенсорів за методиками їх використання для здійснення діагностування основних оптичних величин в біомедицині.

Волоконно-оптичні сенсори з методикою тестування по модуляції інтенсивності випромінювання

Волоконно-оптичні сенсори, принцип роботи яких базується на методиці тестування по інтенсивності випромінювання за формою прийому оптичного випромінювання діляться на дві групи:

1. Зовнішнє випромінювання. Оптичні сенсори з зовнішнім випромінювання ще називають гібридними сенсорами, оскільки поєднують два типи вимірювальної величини: зовнішній (як оптичний так і неоптичний) і внутрішній (оптичний).
2. Внутрішнє випромінювання. В такому типі сенсорів у якості діагностики приймає участь внутрішнє випромінювання вимірюваної системи.

Не залежно від типу сенсора, методика вимірювання полягає у аналізі зміни оптичних характеристик тестуючого випромінювання у відношенні характеристик вхідного до вихідного. Міра зміни таких характеристик і встановлює відносну величину, яка може бути переведена у фізичну величину, в залежності від типу оптичного сенсора.

На рис. 1 показаний принцип роботи оптичного сенсора гібридного типу (з використанням зовнішнього випромінювання).

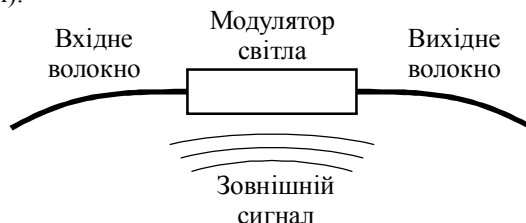


Рисунок 1 – Волоконно-оптичний сенсор гібридного типу

Оптичний сенсор гібридного типу складається з модулятора світла, підключеного до розриву двох волокон (вхідного і вихідного). Модулятор світла представляє собою елемент, який здатний змінювати оптичні характеристики вхідного випромінювання у відповідності до впливу зовнішнього сигналу. До змінюваних оптичних характеристик відносяться: інтенсивність, фаза, частота, поляризація,

спектр та інші параметри і їх комбінації. Тестуюче оптичне випромінювання після того, як воно зазнало змін у модуляторі світла, подається для аналізу на оптоелектронний процесор для здійснення виміру оптичних характеристик.

Оптичний сенсор внутрішнього типу випромінювання відрізняється відсутністю модулятора світла у його будові. У взаємодії із зовнішніми сигналами приймає участь безпосередньо оптичне волокно з тестуючим випромінюванням. На рис. 2 зображений оптичний сенсор внутрішнього типу, в якому зовнішній сигнал взаємодіє безпосередньо з тестуючим випромінюванням у оптичному волокні.

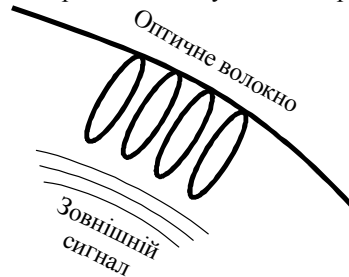


Рисунок 2 – Волоконно-оптичний сенсор внутрішнього типу

В оптичних сенсорах внутрішнього типу зовнішній сигнал взаємодіє з оптичним волокном, у якому розповсюджується тестуюче оптичне випромінювання, основні параметри якого змінюються в наслідок такого впливу. Вплив зовнішнього сигналу на оптичне волокно може змінювати як базові оптичні параметри випромінювання, так і форму оптичних волокон, по якому воно розповсюджується, що в свою чергу призводить до зміни фізичних параметрів хвилеводу, відтак, впливаючи на параметри розповсюдження тестуючого оптичного випромінювання в оптичному тракті.

Різновидом оптичних сенсорів гібридного типу є сенсор переміщення і вібрації (рис. 3). В такому типі сенсорів у якості модулятора світла виступає середовище між двома оптичними волокнами (вхідним та вихідним), яке впливає на характеристики розповсюдження тестуючого випромінювання при розповсюдженні крізь межі двох середовищ: вхідне волокно і повітря, та повітря і вихідне волокно. Оптичні характеристики такого розповсюдження будуть змінюватись при переміщеннях волокон одне відносно іншого: осьового, поздовжнього та поперечно зміщень.

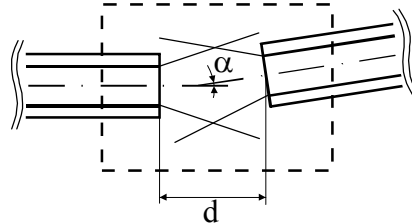


Рисунок 3 – Волоконно-оптичний сенсор для вимірювання зміщення та вібрації:

$\alpha$  – кут радіального зміщення;  $d$  – величина поздовжнього зміщення.

Даний тип сенсору може бути використаний для вимірювання таких величин, як просторове зміщення, тиск, вібрація, температура тощо.

Ще одним варіантом модифікації гібридного сенсору для точного вимірювання зміщень та вібрацій — це волоконно-оптичний сенсор з гнучким дзеркалом (рис. 4). У такому сенсорі головним вимірюючим елементом, який реагує на зміну фізичної величини є дзеркало з гнучким кріпленням, яке здатне зазнавати зміни куту свого розташування в залежності від зовнішнього впливу (наприклад, тиску). При зміні тиску дзеркало відхиляється на певний кут, таким чином, вносячи зміну в результуючу модуляцію інтенсивності тестуючого випромінювання.

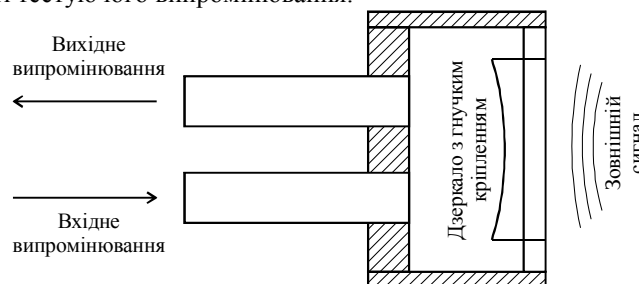


Рисунок 4 – Волоконно-оптичний сенсор для вимірювання зміщення та вібрації з дзеркалом на гнучкому кріпленні

Для вимірювання пропорційності розповсюдження оптичного випромінювання у просторі використовуються групи волокон, вимірний сигнали яких здатні надати відношення пропорцій оптичного випромінювання у відношенні до кожного з волокон. На рис. 5 зображено оптичний сенсор для вимірювання пропорції розповсюдження оптичного випромінювання між двома волокнами. Оптичне випромінювання потрапляє на волокна, які передають отримані оптичні сигнали на фотодетектори.

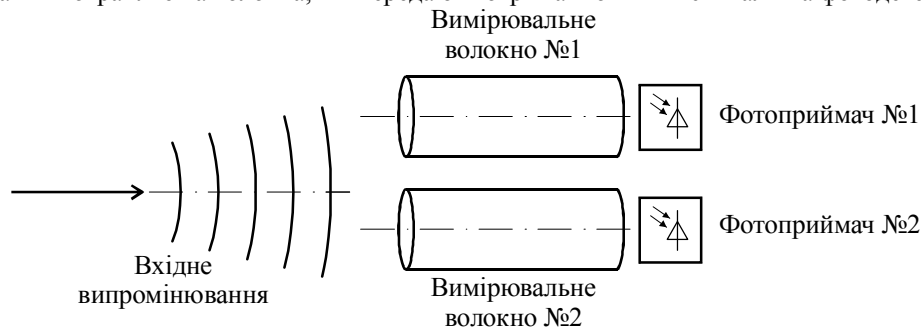


Рисунок 5 – Волоконно-оптичний сенсор для вимірювання пропорції розповсюдження оптичного випромінювання між двома волокнами

Використання більшої кількості волокон у оптичному сенсорі для вимірювання пропорції розповсюдження дозволить будувати 2D картину розповсюдження падіння оптичного випромінювання, таким чином, досліджувати переміщення джерела випромінювання у площині перпендикулярній до вимірюваної площини сенсора.

Використання відбиваючих поверхонь на поверхнях що обертаються дозволяє використовувати оптичні сенсори позиції, таким чином, досліджувати обертальні характеристики об'єкта (рис. 6). На рухому частину деталі наносяться відбиваючі маркери. Протягом обертання сканується відбиття оптичного випромінювання від маркерів, і у разі появи відбиття аналізується кут повороту та позиція частини деталі, що обертається. Даний сенсор дозволяє вимірювати такі характеристики, як частота обертання, швидкість обертання, прискорення обертання, кут обороту, частота обертання та кількість оборотів рухомої частини деталі.

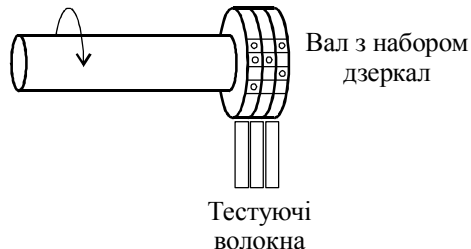


Рисунок 6 – Волоконно-оптичний сенсор дослідження обертальних характеристик

Набір дзеркал на валу деталі, що обертається, дозволяє визначити точну позицію і кут обертання деталі відносно початкового стану в будь-який момент вимірювання.

Мультиплексація оптичного випромінювання по довжині хвилі (WDM) також може використовуватись у волоконно-оптичних сенсорах для дослідження переміщення (рис. 7). Мультиплексоване по довжині хвилі випромінювання передається по вхідному оптичному волокні до демультіплексора, який здійснює розділення оптичного пучка по довжинам хвиль і направляє його у різні волокна, які подають отримане випромінювання на кодуєчу пластину. Випромінювання частково відображується від кодуєчої пластини, потрапляє на мультиплексор і подається на детектори довжин хвиль, де і проводиться аналіз поточного зміщення досліджуваного тіла. Дана методика більш складна у порівнянні з попередніми методиками дослідження переміщення об'єкта, однак, дозволяє проводити дослідження переміщення у різних масштабах, в залежності від параметрів кодуєчої пластинки.

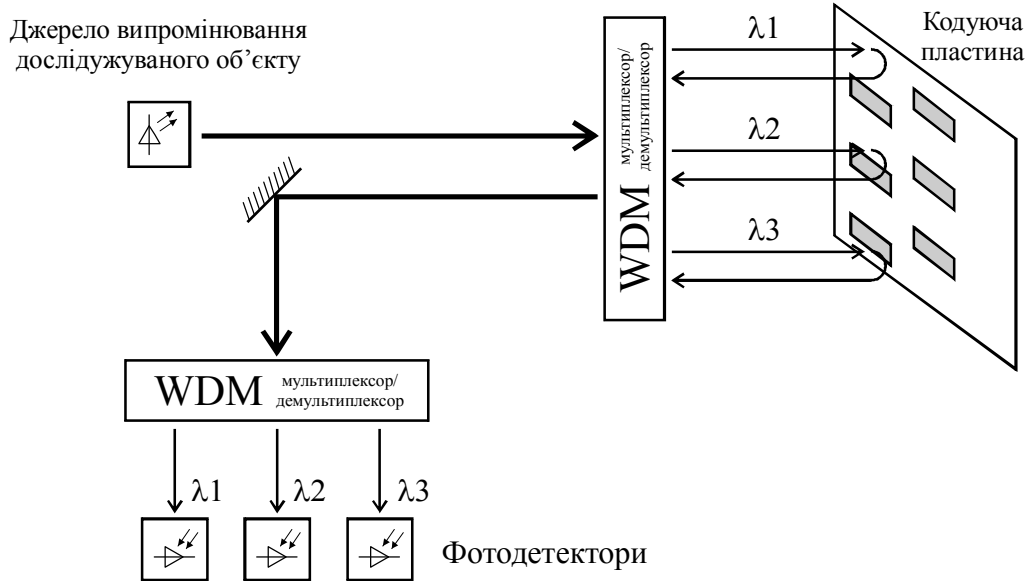


Рисунок 7 – Волоконно-оптичний сенсор дослідження переміщення об'єкту на базі мультиплексації по довжині хвилі (WDM)

Переміщення досліджуваного об'єкту у просторі спричиняє переміщення оптичних сигналів по кодуєчій пластині, відтак, кожен новий стан об'єкта у просторі матиме унікально новий набір модуляцій інтенсивності кожного тестуючого сигналу. Така методика є ефективною, однак структура сенсору складна, і потребує використання складних пристроїв для мультиплексації сигналу.

Існує модифікація даного методу, де змінюється мультиплексація по довжині хвилі на модуляцію по затримці розповсюдження оптичного сигналу (рис. 8). Вхідне тестуюче випромінювання розділяється на три рівні складові і також направляється на кодуєчу пластину, за єдиною відмінністю у тому, що довжина оптичного шляху кожного випромінювача є унікальною. Таким чином, при збереженні функціоналу попередньої методики, значно спрощується будова: достатньо використання одного фотодетектора на одній довжині хвилі, а також зникає потреба використання хвильового мультиплексора.

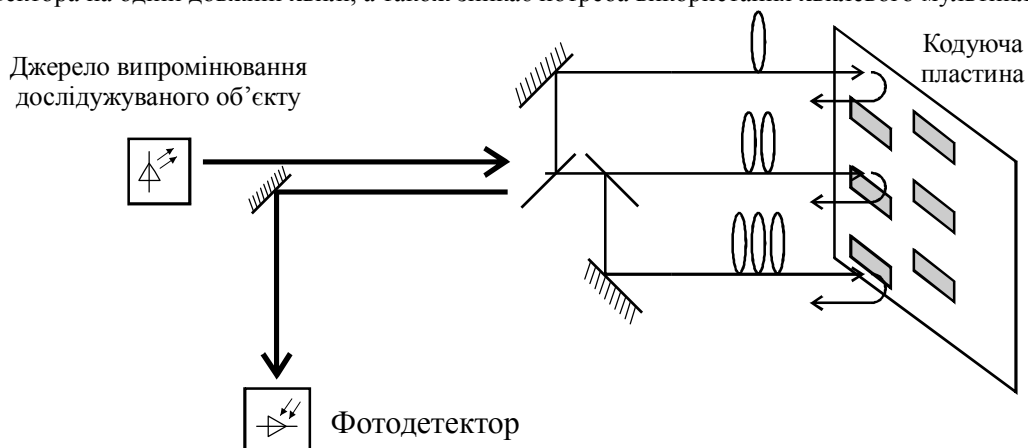


Рисунок 8 – Волоконно-оптичний сенсор дослідження переміщення об'єкту з модуляцією по затримці складових тестуючого випромінювання

Волоконно-оптичні сенсори з методикою тестування на основі повного внутрішнього відбиття

Явище повного внутрішнього відбиття широко застосовується у ряді волоконно-оптичних сенсорів, і базується на властивостях оптичного випромінювання повністю відбиватись від межі двох середовищ з різними показниками заломлення.

На рис. 9 зображений волоконно-оптичний сенсор який використовує явище повністю внутрішнього відбиття у зрізаному оптичному волокні для вимірювання показника заломлення середовища. Оптичне волокно має зріз під критичним кутом розповсюдження випромінювання у волоконно-оптичному тракті. При розташуванні такого сенсору у середовищах с відносно низьким показником заломлення  $n_0$  тестуюче випромінювання зазнаватиме повного внутрішнього відбиття і буде відбиватись у зворотному напрямку. Однак, при зануренні такого оптичного волокна у середовища з показником заломленням приблизно рівними або більшими до критичного — випромінювання почне

частково переходити у досліджуване середовище, таким чином, меншою мірою відбиватися у зворотному напрямку. Дане явище дозволяє встановлювати ПЗ досліджуваного середовища, і у випадку якщо досліджуване середовище встановлено — його фізичні характеристики (температура, тиск, вологість тощо).

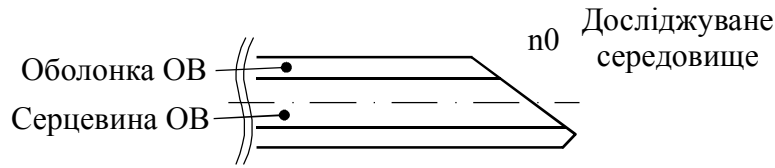


Рисунок 9 – Волоконно-оптичний сенсор на базі повного внутрішнього відбиття зі зрізом волокна під критичним кутом

Даний метод дозволяє вимірювати показник заломлення з точністю від 1 до 10 відсотків.

Одним із варіантів використання даного методу можна назвати датчик для вимірювання рівня рідини (рис. 10). Рідина при заповненні відбиваючої призми змінює характеристики повного внутрішнього відбиття, таким чином частина випромінювання потрапляє і розсіюється у рідині. Такий датчик дозволяє виявляти наявність рідини а також визначати її рівень.

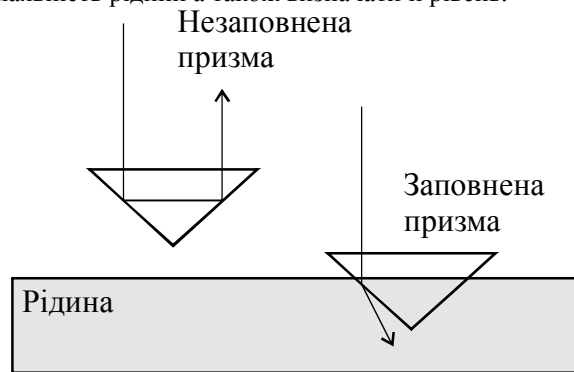


Рисунок 10 – Волоконно-оптичний датчик присутності рідини на основі явища повного внутрішнього відбиття

На рис. 11 зображено сенсор, принцип роботи якого базується на передачі оптичного випромінювання між двома оптичними волокнами. Зміна величин  $L$  та  $d$  розташування волокон одне відносно одного спричинить зміну величини оптичного сигналу, який передається з передаючого у приймаюче волокно. Така зміна може спричинятись зміною температури, тиску або вологості середовища, і може бути встановлена їх величина.

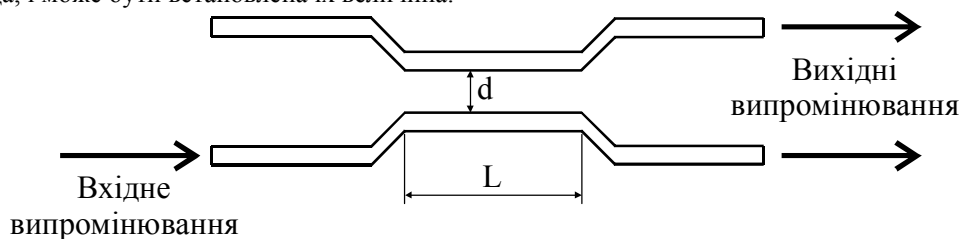


Рисунок 11 – Волоконно-оптичний датчик на основі передачі випромінювання між оптичними волокнами

Для одномодового волокна необхідно, щоб волокна знаходились на відстані 10-20  $\mu\text{m}$  одне від одного, і на показники також впливає показник середовища, у якому даний сенсор розташований. Відтак, використання даного датчика дозволяє вимірювати довжину хвилі, спектр, а також основні характеристики середовища, у яких знаходяться волокна.

Волоконно-оптичні сенсорні з методикою тестування на основі згину оптичних волокон

Деформація, згин, розтягнення, нагрівання, охолодження та інші фізичні впливи на волокно спричиняють вплив на оптичні характеристики оптичного випромінювання, яке розповсюджується по волоконно-оптичному тракту. Контроль зміни цих характеристик дозволяє кількісно вимірювати ту чи іншу складову впливу на волокно.

Типова схема волоконно-оптичного сенсора з методикою тестування на основі згину оптичних волокон представлена на рис. 12.

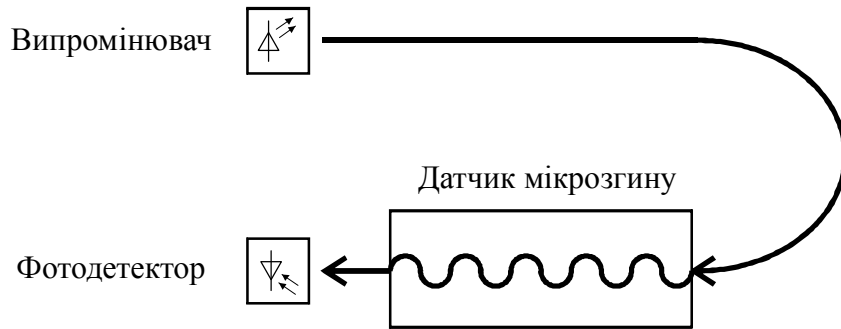


Рисунок 12 – Типова схема волоконно-оптичного сенсора з датчиком мікрозгину

Мікрозгин волокна може спричинитись фізичним впливом вимірюваної величини на волокно, таким чином, проводиться вимірювання базових фізичних величин середовища.

Волоконно-оптичні сенсори з методикою спектрального тестування

Принцип роботи волоконно-оптичних сенсорів зі спектральною методикою тестування полягає у зміні модуляції та довжини хвилі тестуючого випромінювання при розповсюдженні у досліджуваному середовищі. Прикладом таких сенсорів можна назвати сенсори на основі випромінювання абсолютно чорного тіла, поглинання, флюоресценції, еталонної та дисперсійної ґратки.

Одним із найпростіших спектральних сенсорів є датчик абсолютно чорного тіла (рис. 13). Щілина абсолютно чорного тіла розташовується на кінці оптичного волокна, і у нормальному стані вона здійснює поглинання оптичного випромінювання. При збільшенні температури щілини вона починає випромінювати освітлення, яке детектується на фотоприймачі.

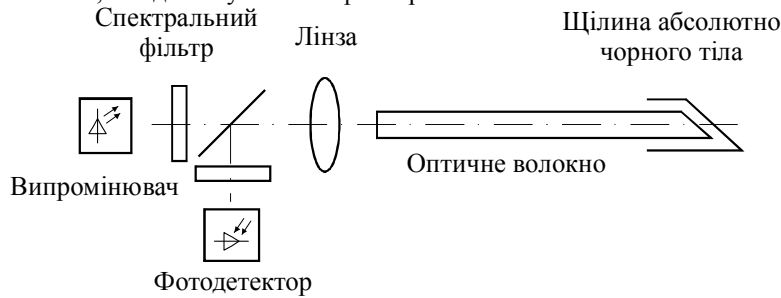


Рисунок 13 – Волоконно-оптичний сенсор на основі абсолютно чорного тіла

Даний тип сенсора дозволяє проводити вимірювання температури середовища при показниках більше 300°C.

Флуоресцентні волоконно-оптичні сенсори широко застосовуються в медицині та хімії, однак можуть також застосовуватись для вимірювання таких фізичних показників як температура, в'язкість та вологість середовища. На сьогодні існує багато варіацій виконання такого сенсора, однак найбільш розповсюджені два зображені на рис. 14, а, б. У першому випадку застосовується флуоресцентний датчик на кінці оптичного волокна, який вносить зміну модуляції оптичного випромінювання і відображає його у зворотному напрямку у волокно. Використання пульсуючого випромінювання дозволяє розділяти цикл вимірювання на фази подачі та прийому випромінювання. У другому випадку застосовується оптичне волокно з принципом розповсюдження оптичного випромінювання на просвітлення. При потраплянні випромінювання на флуоресцентний матеріал воно зазнає перетворення модуляції і продовжує своє розповсюдження до фотоприймача.

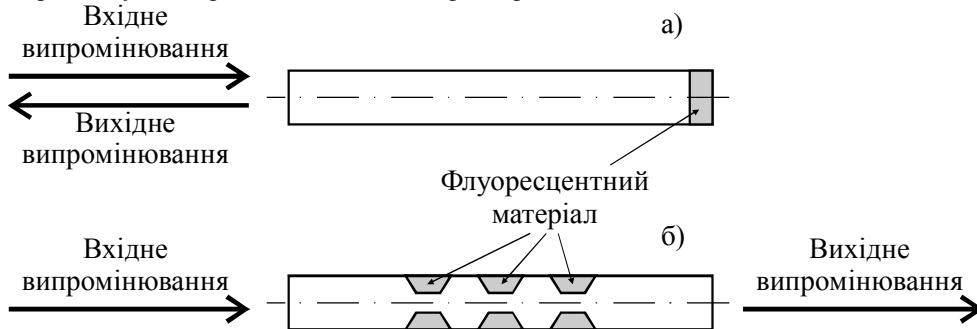


Рисунок 14 – Волоконно-оптичний сенсор на основі флуоресцентного матеріалу

В режимі постійного тестування можуть бути виміряні такі величини, як вологість, насиченість водяної пари у повітрі.

Ще одним варіантом сенсорів на базі оптичного волокна є датчики з використанням тензометрів. Такий датчик виготовляється шляхом легування решітки у ядро оптичного волокна, яке у свою чергу легуване германієм. На рис. 15 представлений варіант виготовлення волоконно-оптичного датчику на базі інтерференційної картини. Два лазерних випромінювача коротких довжин хвиль під різним кутом фокусується на оптичне волокно таким чином, щоб досягнути інтерференції на його поверхні, і, таким чином, інтерференційна картина є основним джерелом інформації про локальні зміни у волокні.

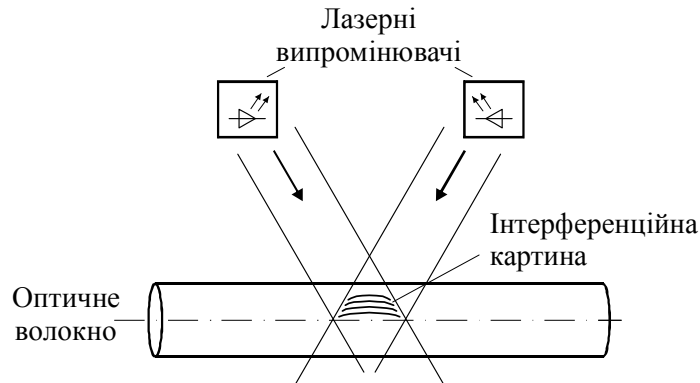


Рисунок 15 – Виготовлення волоконно-оптичного сенсору на базі інтерференційної картини

Для формування інтерференційної картини може використовуватись як тривале лазерне випромінювання, так і імпульси лазерного випромінювання високої потужності. Інтерференційна картина представляє собою періодичні зміни показника заломлення у відповідності до інтерференційних максимумів/мінімумів, що перетворює цю ділянку оптичного волокна в волоконну дифракційну решітку, яка в свою чергу може виконувати функцію модуляції/демодуляції оптичного випромінювання, яке проходить крізь оптичне волокно. На базі даної технології відомі багато методів для виконання волоконно-оптичних сенсорів з функцією демодуляції оптичного випромінювання. Використання волоконно-оптичних сенсорів на базі інтерференційної картини дозволяє проводити вимірювання таких величин як напруженість оптичного волокна, сенсори температури, вологості, вимірювачі показника заломлення середовища та ін.

### Волоконно-оптичні сенсори з методикою інтерферометричного тестування

На сьогоднішній день відомо ряд волоконно-оптичних сенсорів з методикою інтерферометричного тестування, серед яких так звані інтерферометр Сагнака, кільцеві резонатори, інтерферометри Маха-Цендлера та Майкельсона, а також двомодові, поляриметричні, решітчасті, та еталонні інтерферометри.

Інтерферометр Сагнака використовується для вимірювання переміщення у просторі (зокрема, обертання) і використовуються у лазерних гіроскопах, які прийшли на зміну механічним гіроскопам. Інтерферометр Сагнака також може бути використаний для вимірювання подій, які змінюються у часі, такі як акустика, вібрація, напруженість. Існує два варіанти виконання інтерферометра Сагнака: на базі відкритого кільця (менш точні), та на базі закритого кільця (високоточні).

На рис. 16 представлено волоконно-оптичний датчик гіроскопу на базі інтерферометра Сагнака з відкритим кільцем. Тестуюче випромінювання потрапляє з джерела випромінювання крізь оптичний розгалужувач на поляризатор, вихід якого з'єднаний з розгалужувачем випромінювання на дві рівні складові, які крізь модулятор випромінювання подаються безпосередньо у відкрите волоконне кільце. Основною функцією модулятора є генерація змінюваного у часі випромінювання для розділення оптичних сигналів на той що розповсюджується за та проти годинникової стрілки у відкритому кільці інтерферометра. Вихід модулятора приєднаний до волоконного кільця так, щоб попередньо внести зміну у фазу випромінювання. Після проходження випромінювання через кільце воно рекомбінується і подається на вихідний детектор.

Принцип роботи гіроскопу з відкритим кільцем полягає у тому, що при зміні кута нахилу волоконно-оптичного кільця змінюється оптична довжина шляху випромінювань які розповсюджуються за та проти часової стрілки у кільці. Детектор дозволяє визначати дану величину зміни, таким чином представляти кут відхилення гіроскопу у вимірюваному середовищі. Точність вимірювання даним методом обмежується роздільною здатністю детектора а також розміром відкритого кільця.

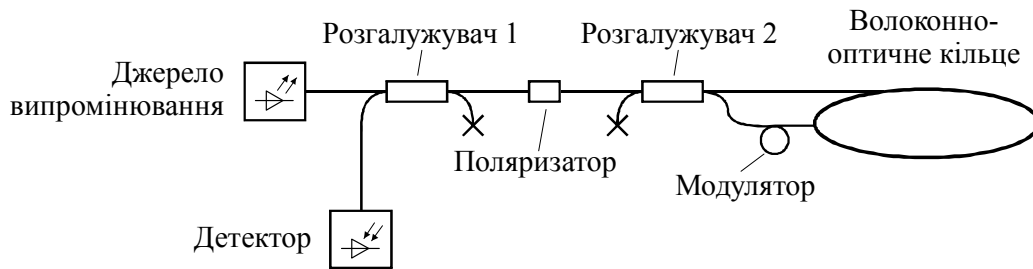


Рисунок 16 – Волоконно-оптичний датчик гіроскопу на базі інтерферометра Сагнака з відкритим кільцем

Для покращення динамічного діапазону датчику використовується так звана закрите кільце, в якому фазова зміна, що викликається переміщенням кільця у просторі, компенсується пропорційним фазовим зміщенням. На рис. 17 представлено волоконно-оптичний датчик гіроскопу на базі інтерферометра Сагнака з закритим кільцем. В даній реалізації відносна частотна зміна оптичного випромінювання у волоконному кільці перетворюється у фазову зміну, яка пропорційна довжині волоконно-оптичного кільця і частоті зміщення. Даний ефект досягається використанням модулятора у волоконно-оптичному кільці, який генерує зміщення фази на величину  $\omega$ . Коли кільце починає обертатись, перша гармоніка сигналу змінюється на фазу, пропорційну куту обертання гіроскопу. Шляхом використання даної зміни фази як помилкової, здійснюється вирівнювання частоти за допомогою синхронного демодулятора до того моменту, поки фази сигналів не співпадуть. Величина зміни фази і характеризує кількісне значення відхилення положення волоконно-оптичного кільця у просторі.

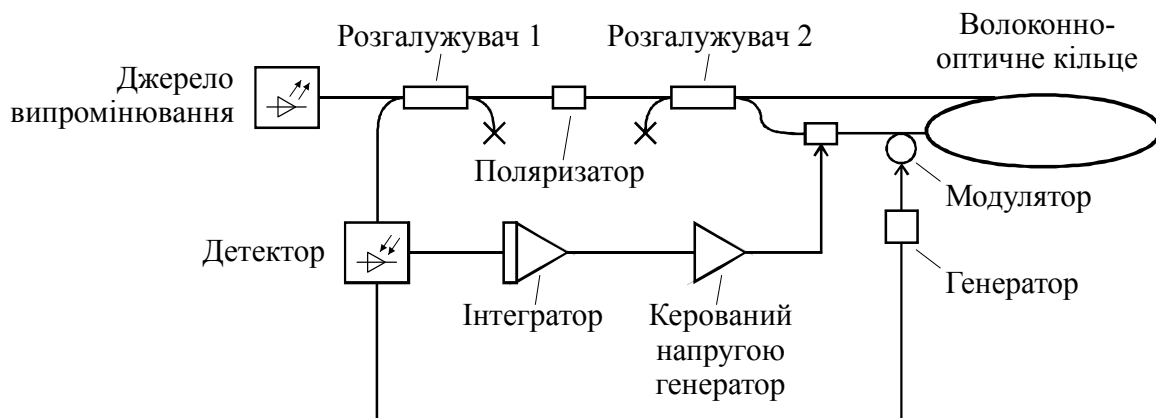


Рисунок 17 – Волоконно-оптичний датчик гіроскопу на базі інтерферометра Сагнака з закритим кільцем

Ще одним видом волоконно-оптичних датчиків на базі інтерферометричного ефекту є інтерферометри Маха-Цендлера і Майкельсона. Ці інтерферометри представляють собою великий інтерес за рахунок того, що дозволяють використовувати гнучку геометрію побудови датчику, і при цьому володіють високою точністю вимірювання.

На рис. 18 показано базові елементи схеми волоконно-оптичного датчику на базі інтерферометра Маха-Цендлера. Модуль випромінювача представляє собою джерело випромінювання, яке подає випромінювання на розгалужувач оптичного випромінювання на два канали. Датчик інтерферометра у загальному вигляді представляє собою модуль з двома оптичними волокнами, які просторово взаємодіють з вимірюваною величиною, і побудований так, що зміна вимірюваної величини спричиняє вплив на волокна, спонукаючи до зміни фази у двох волокнах на величину  $\phi$ , яка і визначається гомодинним демодулятором, який і визначає величину зміни оптичного шляху одного випромінювання відносно іншого.

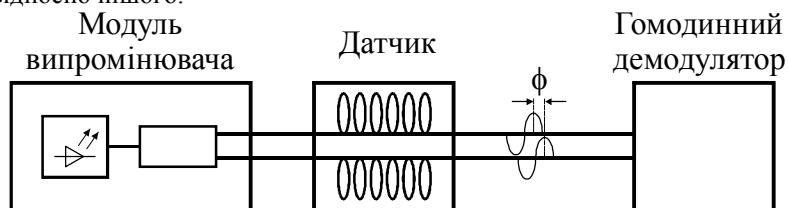


Рисунок 18 – Базова схема волоконно-оптичного датчика на базі інтерферометра Маха-Цендлера



Інтерферометр Майкельсона схожий на інтерферометр Маха-Цендера, з єдиною відмінністю у тому, що використовуються дзеркала на кінцях обох оптичних волокон, таким чином вносячи ефект подвійного проходження тестуючого випромінювання через модуль датчика (див. рис. 19).

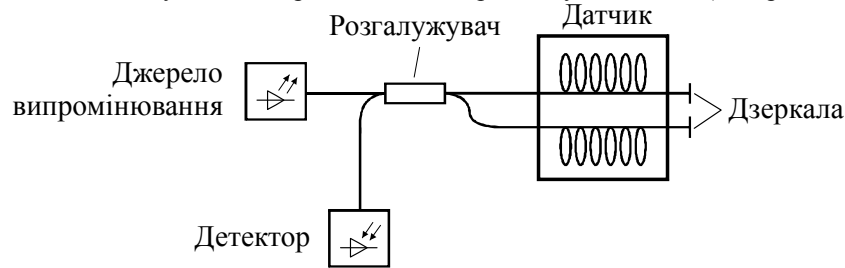


Рисунок 19 – Базова схема волоконно-оптичного датчика на базі інтерферометра Майкельсона

**Волоконно-оптичні датчики з мультиплексною та розподіленою методикою тестування**

Часова мультиплексація тестуючого сигналу у волоконно-оптичних датчиках дозволяє дискретно аналізувати часові показники розповсюдження оптичного випромінювання між датчиками в тестуючій системі. Така методологія використовується у системах, де одночасно проводиться вимірювання відразу кількох величин: напруженості волокна, температури, тиску та ін. показників. На рис. 20 зображено волоконно-оптичний датчик з методикою часової мультиплексації. Модуль керування проводить періодичні передачі імпульсів тестуючого випромінювання, яке потрапляє на тестуючі датчики, відображається від них і потрапляє на детектор. Отримане оптичне випромінювання аналізується модулем керування, після чого результати накопичуються у формі рефлектометричних даних.

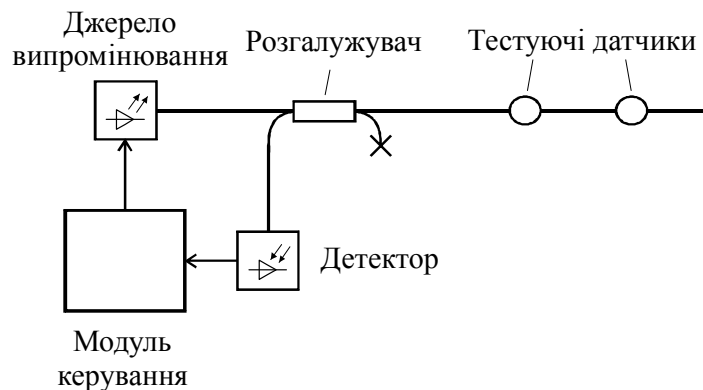


Рисунок 20 – Волоконно-оптичний датчик з методикою часової мультиплексації

На рис. 21 зображено волоконно-оптичний датчик з методикою мультиплексації по частоті. В даній методиці джерело лазерного випромінювання надсилає оптичні сигнали різних частот із зубчатою модуляцією сигналу. При розміщенні датчиків у вигляді інтерферометрів Маха-Цендера на відстанях  $(L-L_1)$ ,  $(L-L_2)$  та  $(L-L_3)$ , які значно відрізняються від результуючих частот кожного сенсору  $(dF/dt)(L-L_n)$ , що дозволяє розділити сигнали від кожного із датчиків, які встановленні на єдиному оптичному волокні.

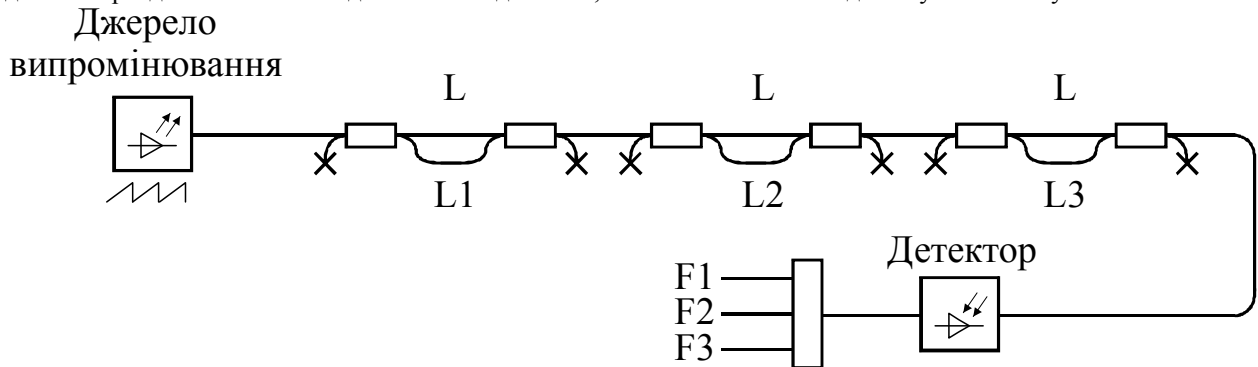


Рисунок 21 – Волоконно-оптичний датчик з методикою мультиплексації по частоті

Мультиплексація оптичного сигналу по довжині хвилі є однією із найбільш ефективних, оскільки дозволяє використовувати оптичну потужність сигналу дуже ефективно, а також дає можливість легко інтегрувати в існуючу оптичну систему довільну кількість датчиків, які працюють на своїх довжинах хвиль.

На рис. 22 зображено приклад системи волоконно-оптичних датчиків з мультиплексацією по довжині хвилі. Джерело випромінювання з широким спектром випромінювання вводить в оптичне волокно тестуюче випромінювання, яке потрапляє на оптичні датчики, кожен з яких відображує сигнал на своїй довжині хвилі, після чого сигнал потрапляє на демультиплексор по довжині хвилі і аналізується відповідним датчиком. Для розділення сигналу зазвичай використовується дисперсійний елемент, такий як призма чи дифракційна решітка.

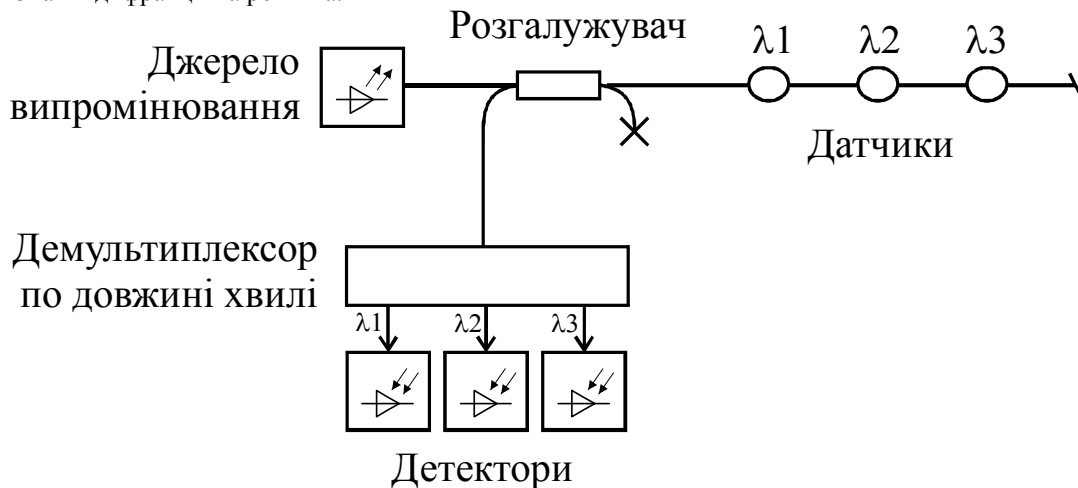


Рисунок 22 – Волоконно-оптичний датчик з методикою мультиплексації по довжині хвилі

#### Висновки

В роботі проведений аналіз основних типів волоконно-оптичних сенсорів, які можуть бути використані в для дослідження біомедичних тканин та матеріалів. Класифікація сенсорів дала змогу розділити їх за типом призначення на тих, що забезпечують передачу основної вимірюваної величини, виконуючи функцію транспортування сигналу, та тих, що проводять перетворення вимірюваної величини у змінювані характеристики тестуючого оптичного сигналу, які далі можуть бути декодовані оптико-електронним перетворювачем у основну вимірювану величину.

#### Список літератури

1. Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Петрук В. Г., Колісник П. Ф. Фотоплетизмографічні технології контролю серцево-судинної системи. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2007. – 254 с.
2. Петрук В.Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ. Теорія і практика оптичного вимірювального контролю. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2000. – 207 с.
3. Кузьмич В.В. Основные принципы и особенности транскутанной "отра-жательной" оксиметрии // Мед. техника. – 1993. – №3. – С. 36-42.
4. Павлов С.В., Кожем'яко В.П., Петрук В.Г., Колісник П.Ф., Марков С.М. Біомедичні оптико-електронні системи і апарати. Ч.1. Неінвазивні методи діагностики серцево-судинної системи. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 142 с.
5. Заболотна Н.І., Павлов С.В., Шолота В.В. Комп'ютерне моделювання задач лазерної та оптоелектронної техніки. Навч. посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2003. – 149 с.
6. Павлов С.В., Колісник П.Ф., Матохнюк М.В., Островський І.Я. Оптико-електронний метод для дослідження трофічного комплексу тканини. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – №1. – С.55-60.
7. Павлов С.В., Кожем'яко В.П., Петрук В.Г., Колісник П.Ф., Марков С.М. Біомедичні оптико-електронні системи і апарати. Ч.1. Неінвазивні методи діагностики серцево-судинної системи. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 142 с.
8. Павлов С.В., Мисловський І.Д., Ахмед Авад. Оптико-електронні інформаційні технології дослідження рівня периферійного кровообігу / Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції "Медичні технології і вища освіта". – Луцьк, 2004. – С. 137-144.

9. Павлов С.В., Станіславчук М.А., Хоменко В.М. Застосування оптико-електронних технологій при аналізі кровопостачання чутливих точок у хворих на фіброміалгію / Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції "Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС-2005»". – Вінниця, 2005. – С. 165.
10. Павлов С.В., Превар А.П., Матохнюк М.В., Чернуха А. Застосування оптико-електронних та лазерних технологій при аналізі мікроциркуляторних змін у вогнищі гострого гнійного запалення в ділянці нижніх кінцівок // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології . – 2002. – №2 – С.148-154.
11. E. Udd, Editor, Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, Wiley, New York, 1991.
12. J. Dakin and B. Culshaw, Optical Fiber Sensors: Principals and Components, Volume 1, Artech, Boston, 1988.
13. B. Culshaw and J. Dakin, Optical Fiber Sensors: Systems and Applications, Volume 2, Artech, Norwood, 1989.
14. T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh, and R. G. Priest, "Optical Fiber Sensor Technology", IEEE J. Quant. Elec., QE-18, p. 626, 1982.
15. K. Fritsch, Digital Angular Position Sensor Using Wavelength Division Multiplexing, Proceedings of SPIE, Vol. 1169, p. 453, 1989.
16. K. Fritsch and G. Beheim, Wavelength Division Multiplexed Digital Optical Position Transducer, Opt. Lett., Vol. 11, p. 1, 1986.
17. D. Varshneya and W. L. Glomb, Applications of Time and Wavelength Division Multiplexing to Digital Optical Code Plates, Proceedings of SPIE, Vol. 838, p. 210, 1987.

#### **Відомості про авторів**

Павлов Сергій Володимирович — д.т.н., проф., зав. кафедри фізики та фотоніки Вінницького національного технічного університету.

Азаров Олексій Дмитрович — д.т.н., проф., зав. Кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету.

Просоловський Руслан Васильович — аспірант кафедри фізики та фотоніки Вінницького національного технічного університету.