

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ОПТОВОЛОКОННИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ ПОВНОГО
ВНУТРІШНЬОГО ВІДБИТТЯ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФТОІм-21-1
Лазуренко Д.Р.
(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 «Фотоніка та
оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

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

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
(повна назва)
Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____
(повна назва)
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка _____
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма _____ «Фотоніка та оптоінформатика» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Лазуренку Данилі Руслановичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Оптоволоконний сенсор на основі повного внутрішнього відбиття _____

затверджена наказом університету від « 04 » листопада 2022 р. № 1444 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 26 _____ грудня _____ 2022 р. _____

3. Вихідні дані до роботи _____ довжина хвилі випромінювання, показник заломлення оптичного волокна. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____ 1 Дослідження волоконних датчиків. 2 Дослідження датчиків на основі повного внутрішнього відбиття. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 10 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел датчиків на основі повного внутрішнього відбиття	01.09.22 – 30.09.22	Виконано
2	Дослідження волоконних датчиків	01.10.22 – 20.10.22	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик волоконних датчиків	21.10.22 – 05.11.22	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів датчиків	06.11.22 – 15.11.22	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	16.11.22 – 30.11.22	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	01.12.22 – 09.12.22	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	10.12.22 – 22.12.22	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	23.12.22–24.12.22	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	25.12.22 – 27.12.22	

Дата видачі завдання 01 вересня 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 48 с., 21 рис., 1 табл., 1 додаток, 24 джерела.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК, ЗОВНІШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ, НАПРАВЛЕНЕ ВОЛОКНО, ПОВНЕ ВНУТРІШНЄ ВІДБИВАННЯ, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ.

Метою – ознайомлення з конструкцією та принципом дії датчика повного внутрішнього відбиття, моделювання його роботи при вимірюванні концентрації розчиненого цукру в розчині.

Об'єкт дослідження – датчик на основі методу повного внутрішнього відбиття.

Метод дослідження аналітико-числовий.

У першій частині було проведено детальне дослідження датчиків на основі повного внутрішнього відбиття, розглянуто їх конструкцію, принцип дії, сфери застосування та розвиток у сучасному світі.

Друга частина містить міркування щодо рідинних датчиків, які працюють на основі повного внутрішнього відбиття. Проведено чисельний розрахунок датчика повного внутрішнього відбиття для вимірювання концентрації цукру в розчині.

ABSTRACT

Explanatory note of qualifying work: 48 p., 21 fig., 1 table, 1 applications, 24 sources.

FIBER OPTIC SENSOR, EXTERNAL ENVIRONMENT, DIRECTED FIBER, TOTAL INTERNAL REFLECTION, REFRACTIVE INDEX.

The goal is to get acquainted with the design and principle of operation of the total internal reflection sensor, modeling its operation when measuring the concentration of dissolved sugar in a solution.

The object of research is a sensor based on the method of total internal reflection.

The research method is analytical and numerical.

In the first part, a detailed study of sensors based on total internal reflection was carried out, their design, principle of operation, areas of application and development in the modern world were considered.

The second part contains considerations for liquid sensors that operate on the basis of total internal reflection. A numerical calculation of the total internal reflection sensor for measuring the sugar concentration in the solution was carried out.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	7
Вступ.....	8
1 Волоконно-оптичні датчики повного внутрішнього віддзеркалення.....	9
1.1 Фізичні основи волоконо-оптичних датчиків.....	9
1.2 Типи оптичних датчиків.....	11
1.2.1 Волоконий датчик рівня рідини.....	11
1.2.2 Оптичний датчик мікроскопічних переміщень.....	14
1.2.3 Волоконий датчик переміщення.....	15
1.2.4 Датчик зі змінним стрибком показника на межі світловода	19
1.2.5 Датчик магнітного поля	24
1.3 Датчик типу рідини	25
2. Математична модель датчика на основі ПВВ.....	31
2.1 Волоконно-оптичні датчики із граничною модуляцією оптичного випромінювання (рівномірний та ламбертовський розподіл інтенсивності випромінювання).....	35
2.2 Розрахунок параметрів датчика концентрації цукру на основі ПВВ.....	41
Висновки.....	46
Перелік джерел посилання.....	47
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	49

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- ВД – волоконий датчик;
ВОД – волоконо-оптичний датчик;
ДВ – джерело випромінювання;
ДМП – датчик магнітного поля;
ДС – діаграма спрямованості;
ЗС – зовнішня середа;
ЗСП – змінний стрибок показника;
КС – керуємий світловод;
ПВВ – повне внутрішнє віддзеркалення.

ВСТУП

Удосконалення систем автоматичного керування та управління різними об'єктами, процесами, виробництвами значною мірою визначається досягненнями в галузі створення вимірювальних перетворювачів. Багато вироблених датчиків і перетворювачів не завжди задовольняють споживачів за такими основними метрологічними характеристиками, як висока чутливість і надійність, довговічність, стабільність, габарити і маса, а також низьке енергоспоживання і сумісність з мікроелектронними пристроями обробки інформації. Цим вимогам найбільшою мірою відповідають сучасні оптичні датчики (ВОД).

В останнє десятиліття з'явилася нова тенденція, яка використовує оптичне випромінювання та унікальні властивості оптичних носіїв для реєстрації різних фізичних явищ. Цьому сприяли також успіхи у виробництві оптичних кабелів і широке використання їх для передачі інформаційних сигналів.

Розвиток оптичних датчиків (ВОД) йде шляхом заміни традиційних датчиків, коли споживача не влаштовують їх параметри, або шляхом розробки пристроїв з новими функціями. Вони конкурентоспроможні в тих випадках, коли необхідно забезпечити роботу в умовах сильних електромагнітних полів, в агресивному і вибухонебезпечному середовищі разом з оптичними лініями зв'язку. Нині це напрямок розвитку вимірювальних перетворювачів, у рамках якого створюються датчики появи рідини, тиску, сили, переміщення, швидкості, акустичного навантаження, напруженості електричного та магнітного полів тощо [1, 2].

Перші успішні спроби створення сенсорів на основі оптичних волокон можна віднести до середини 1970-х років. У другій половині 1970-х років з'явилися публікації про більш-менш прийнятні розробки та експериментальні зразки таких датчиків. Однак передбачається, що цей тип сенсорів сформувався як один із технологічних напрямків лише на початку 1980-х років. Тоді ж з'явився термін «волоконно-оптичні датчики». Раніше для визначення того чи іншого параметра в таких перетворювачах використовувалися аналогові електровимірювальні прилади. В даний час база елементів істотно змінилася, а впровадження цифрової вимірювальної техніки принципово змінило підхід до їх створення [1].

1 ВОЛОКОНО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ПОВНОГО ВНУТРІШНЬОГО ВІДДЗЕРКАЛЕННЯ

1.1 Фізичні основи оптичних датчиків

Внутрішнє віддзеркалення – явище відбивання електромагнітних або звукових хвиль від поверхні розділу двох середовищ за умови, що хвиля надходить із середовища, де швидкість її поширення менша (у випадку променів світла це відповідає більшому показнику заломлення). Розрізняють неповне і повне внутрішнє відображення.

Повне внутрішнє віддзеркалення – відповідає вінстан, коли кут падіння перевищує деякий критичний кут. В оптиці це явище спостерігається для широкого спектру електромагнітного випромінювання, включаючи рентгенівську область.

У геометричній оптиці явище пояснюється з точки зору закону Снелла. Оскільки кут заломлення не може перевищувати 90° , то отримуємо, що при куті падіння, синус якого більший за відношення меншого показника заломлення до більшого, електромагнітна хвиля повинна повністю відбиватися в першому середовищі. .

Відповідно до хвильової теорії, електромагнітна хвиля все-таки переходить у друге середовище – там поширюється так звана «неоднорідна хвиля», яка експоненціально затухає і не несе з собою енергії. Характерна глибина проникнення неоднорідних хвиль у друге середовище має порядок довжини хвилі [1, 2].

Природа процесу повного внутрішнього відбивання вимагає знання класичної теорії електромагнітних хвиль. У 1864 році Джеймс Максвелл переконливо довів, що світло має електромагнітну природу. Добре відомі рівняння Максвелла можна використовувати для аналізу фізичного явища, яке виникає, коли хвиля перетинає межу між двома різними діелектричними матеріалами. Це дуже важливо для оптичних волокон, оскільки волокно повинно мати діелектричну зовнішню оболонку для захисту та підтримки. На рис. 1.1 зображено хвилю, що поширюється зі швидкістю v_1 в першому середовищі і швидкості v_2 – у другому [3].

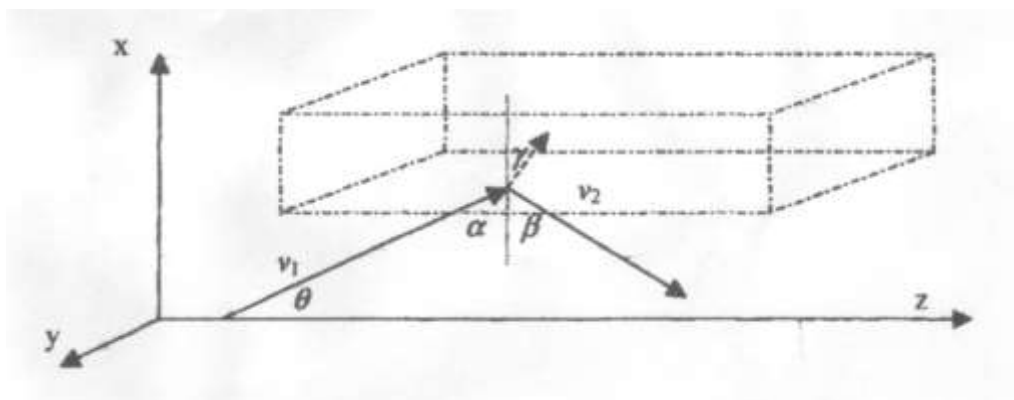


Рисунок 1.1 – Проходження хвилі через розділення двох середовищ

Закон Снелла пояснює заломлення світла на межі двох середовищ у геометричній оптиці:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1}. \quad (1.1)$$

Відповідно до хвильової теорії, електромагнітні хвилі все ж проникають у друге середовище – там поширюється так звана неоднорідна хвиля, яка експоненціально затухає і не несе з собою енергії.

Якщо кут падіння α збільшується, то при певному його значенні заломлений промінь повністю зникає ($\gamma = 90^\circ$). Кут α називається критичним кутом ковзання:

$$\alpha_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (1.2)$$

Якщо необхідно, щоб хвиля поширювалася в світловоді без втрат, то кут падіння на стінки α повинен бути достатнім для повного внутрішнього відбиття.

При кутах падіння більше критичного заломлення світлового потоку (в ідеальному випадку) не відбувається, межа розділу набуває властивостей дзеркала – вся енергія залишається у відбитому потоці. Це явище є ефектом внутрішнього відбиття.

1.2 Типи оптичних датчиків

1.2.1 Волокнистий датчик рівня рідини

Основним завданням цих датчиків є реєстрація зовнішньої дії, що призводить до незначної зміни показника заломлення зовнішнього середовища (ЗС). Для реєстрації зміни показника заломлення ЗС оптичного волокна також можна використовувати оптоволокно ВС з крутими вигинами, на які спрямовані моди оптичного волокна, переходять в оболонкові та випромінювальні моди, що призводить до зменшення сигнал на виході оптичного волокна. Зазвичай для таких вимірювань використовуються датчики радіусу вигину $R_{виг}$ є менш критичним, ніж деякі $R_{кр}$, при якому все випромінювання покидає сердцевину ВС і виходить в оболонку. Волоконно-оптичний датчик такого типу показано на рис. 1.2 [4, 5].

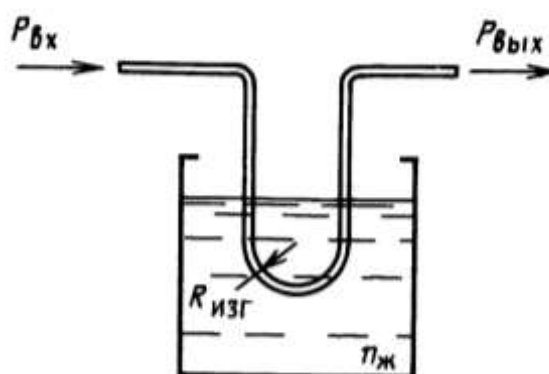


Рисунок 1.2 – Оптичний датчик рівня або типу рідини за допомогою крутого вигину оптичного волокна

Опустіться в середовище, яке має вигин із радіусом $R_{виг} \leq R_{кр}$ вводиться випромінювання зі спектральним розподілом потужності $P_{ex}(\lambda)$. В області згину випромінювання після виходу з оболонки потрапляє на межу розділу оболонки та зовнішнього середовища в певному діапазоні кутів падіння.

Граничні кути падіння θ_1 і θ_2 визначаються за допомогою показника заломлення зовнішнього середовища $n_t = n_{t_1}$, при якому сигнал на виході ВС починає згасати, а індикатор $n_t = n_{t_2}$, при якому сигнал на виході ВС перетворюється в нуль:

$$\theta_{1,2} = \arcsin(n_{t1,t2} / n_2). \quad (1.3)$$

Якщо вся сила розподілена вздовж кутів падіння θ_i в цьому діапазоні відповідно до деякої функції розподілу $f(\theta_i)$, то без урахування втрат у матеріалі ВС, за $n_t < n_i$ ми маємо:

$$\frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta_i) d\theta_i = 1 \quad . \quad (1.4)$$

Якщо зігнутий ВС занурити в зовнішнє середовище, то спектр потужності випромінювання на його виході можна визначити як:

$$P_{вых}(\lambda) = \frac{P_{ex}(\lambda)}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta_i) R(\theta_i, \lambda) d\theta_i, \quad (1.5)$$

де $R(\theta_i, \lambda)$ – відбивна здатність межі розділу оболонка – зовнішнє середовище, яка визначається за формулою Френеля [6].

Розглянувши наведені вище формули (1.5), можна зробити висновок, що за відсутності поглинання в зовнішньому середовищі потужність випромінювання

на виході ВС лінійно залежить від малої зміни показника заломлення. У лінійному наближенні вихідна потужність зігнутого променя, ВС оточеного зовнішнім поглинаючим середовищем, буде пропорційна дисперсії показника заломлення та поглинання. Для оцінки різних конструкцій сенсорів на основі зігнутих багатомодових ВС необхідно визначити залежність пропускання світла лазерів від радіуса вигину, апертури лазера, діаграми спрямованості.

Чисельно спрямовані мод ВС можна визначити за формулою:

$$N = (ak_0n_1\theta_m)^2 / 2, \quad (1.6)$$

де a – радіус сердечника ВС;

$$k_0 = 2\pi / \lambda;$$

θ_m – критичний кут розширення високої моди;

n_1 – показник заломлення ядра ВС.

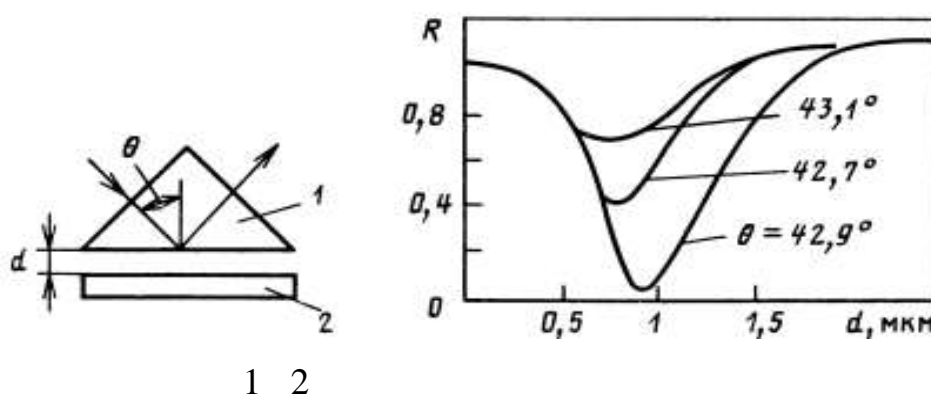
Таким чином, світлопропускання ВС залежить від радіуса вигину і параметрів ВС і не залежить від довжини хвилі випромінювання. А зміна пропускання оптичного каналу при управлінні його геометрією може бути використана як основа для роботи ряду ковзних, тискових і силових ВОД. Модулятор на основі зігнутого світловоду, максимально підходить для роботи з низькими акустичними частотами. Великий вплив на світловод надає використання профільованих пластин, завдяки чому збільшується зусилля на світловоді, кількість вигинів і тим самим втрати випромінювання в ньому. У датчиках тиску такого типу можна використовувати звичайні ВС, але для досягнення найкращої чутливості потрібно використовувати спеціальні світловоди. Можливе використання тунельного ефекту, за допомогою якого можна зареєструвати процеси, що призводять до мікрорухів тіла [7–9].

1.2.2 Оптичний датчик мікроскопічних переміщень

Оптичний датчик мікропереміщення працює на основі ефекту світлового тунелю і залежності коефіцієнта відбиття сигналу від величини зазору між призмою скла ПВВ і плівкою срібла.

Тут особливу увагу слід звернути на те, що рух зовнішніх тіл, які знаходяться на невеликій відстані від чутливої поверхні оптичного волокна, викличе зміну початкових умов ПВВ, що призведе до модуляції потоку відбитого випромінювання.

Зазор d можна змінити за допомогою п'єзоелектричних пристроїв і акустичних полів. На рис. 1.3 зображено оптичний мікродатчик переміщення на основі ефекту світлового тунелю та залежність коефіцієнта відбиття сигналу від розміру зазору між призмою зі скла ПВВ та плівкою срібла [10–11].



1 – скляна призма ПВВ;

2 - срібна плівка.

Рисунок 1.3 – Оптичний датчик мікропереміщення на основі ефекту світлового тунелю і залежності коефіцієнта відбиття сигналу від розміру зазору між призмою скла ПВВ і плівкою срібла

Для збільшення площі оптичного контакту вигідніше тунелювати енергію оптичного випромінювання від оптичного волокна безпосередньо в мембрану, яка

реагує на зміну зовнішнього тиску. У цьому випадку світловод повинен бути без оболонки, а ефективний оптичний контакт буде забезпечений, якщо світловод матиме форму плоскої спіралі, розміщеної під мембраною (рис. 1.4) [12–13]. Даний ВОД складається з наступних компонентів: 1 – оптичний світловод, 2 – повітряний зазор, 3 – мембрана, 4 – спіральний світловод, 5 – силовий світловод, 6 – підставка. Розглядаючи більш детально технологію виготовлення датчиків на основі ПВВ порушень, стає зрозуміло, що чутливість до дуже малих рухів висуває високі вимоги до виробництва таких датчиків.

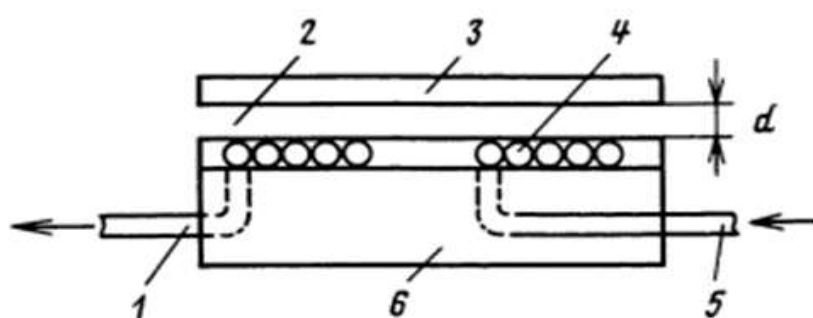


Рисунок 1.4 – Волоконний датчик тиску на основі тунельного випромінювання від оптичного волокна до мембрани

Умова ПВВ виконується за рахунок частини, яка не контактує з рухомим середовищем і розривається в зоні оптичного контакту. Якщо розширити цю зону, то це призведе до зменшення каналізованого потоку випромінювання, реєстрація якого дозволить визначити величину зовнішньої дії. Використання довгої чутливої поверхні призводить до того, що необхідно аналізувати розподіл полів випромінювання на цій поверхні.

1.2.3 Волоконний датчик переміщення

Також використовується датчик зміщення нитки спотворення ПВВ також використовується для модуляції випромінювання в тонкоплівкових хвилеводах, і спотворення в цьому випадку здійснюється в площині хвилеводу. Модулятор

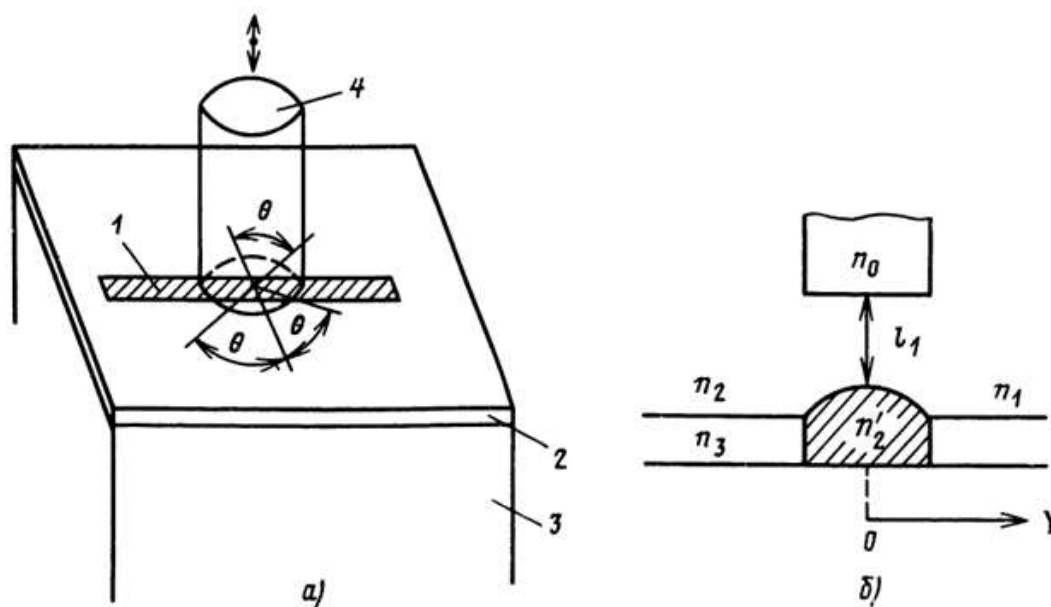
складається з підкладки, хвильовдної фольги з вбудованим каналом, що має менший показник заломлення, розділового шару та діелектричного тіла (рис. 1.5, а, б).

Нерівність виконується для показників заломлення комутаційних елементів (рис. 1.5, б). $n_1 > n_2' > n_0 > (n_1, n_3)$. Профіль показника заломлення в каналі відповідає розподілу Гауса:

$$n_2'(y) = n_2[1 - \Delta \exp(-2y^2 / d^2)], \quad (1.7)$$

де $\Delta = (n_2 - n_2') / n_2$;

d – ширина каналу нижнього показника заломлення.



1 – вбудований канал; 2 – тонкоплівковий хвильовід; 3 – підкладка;
4 – діелектричне тіло.

Рисунок 1.5 – Датчик переміщення хвильоводу на основі порушення ПВВ
(а) та пояснення принципу його роботи (б)

На рисунку вказано версію датчик переміщення хвильоводу на основі порушення ПВВ.

Ефективний показник заломлення каналу є показником заломлення $n'_{2\text{эф}}$ і залежить від товщини розділового шару. l_1 між рухомим діелектричним тілом і хвилеводом. Якщо випромінювання, що поширюється по хвилеводу, падає на канал з меншим показником заломлення під кутом θ , що більше критичного кута ПВВ $\theta_{\text{кр}}$, потім відбитий від русла; інакше він перетне канал. Критичний кут $\theta_{\text{кр}}$ визначається співвідношенням ефективних показників заломлення каналу і хвилеводу. Оптичні властивості каналу з низьким показником заломлення можна змінити прямою електричною дією на канал, якщо хвилевідну плівку виготовлено з електрооптичного матеріалу. Електроди можна розташувати під певним кутом до напрямку поширення випромінювання на поверхні хвилеводу на основі, наприклад, Ti:LiNbO_3 . Орієнтація електрооптичного матеріалу повинна бути такою, щоб при подачі напруги на електроди показник заломлення області хвилеводу, розташованої між електродами, зменшувався. Промінь, що падає на цю область, починає зазнавати РВВ, коли електричне поле досягає інтенсивності:

$$E_{\text{ПВО}} = U / d = \left(n_1^2 \gamma_{33} \right)^{-1} (\psi / 2)^2, \quad (1.8)$$

де n_1 – показник заломлення під напругою;

d – відстань між електродами;

$\frac{\psi}{2}$ – кут між напрямком випромінювання та лінією електрода.

Подібним чином була досягнута глибина модуляції 95 % на частоті кілька гігагерц при напрузі $U = 5$ В і $\lambda = 0,63$ мкм. Виходячи з виразу (1.8), ми можемо сказати, що кінці двох хвилеводів з'єднані оптичними властивостями і контролюються як тепловими, так і електричними впливами на матеріал. На рис. 1.6 зображено оптичний датчик на основі мікровигинів світловода, який складається з наступних компонентів: 1 – вхідне випромінювання, 2 – світловод, 3 – діюча сила, 4 – профільовані пластини, 5 – вихід випромінювання.

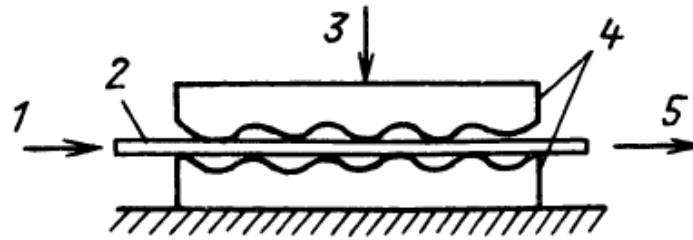


Рисунок 1.6 – Датчик оптичної сили на основі мікрозгинання оптичного волокна

Температурна зміна показника заломлення скла становить $\text{прибл } 10^{-3}$ при зміні температури від нуля до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це може збільшити відносну інтенсивність сигналу, що проходить у хвилевід. Крім того, через перетворення моди, спричинене мікрозгином, і вихід енергії мод вищого порядку в оболонку та навколишнє середовище, ми спостерігаємо падіння вихідної потужності ВС.

Доведено, що періодичні мікрОВигини, створені вздовж осі ВС, призводять до зв'язку між модами, безперервне поширення яких β і β' відповідати умові:

$$\beta - \beta' = \pm 2\pi / \Lambda, \quad (1.9)$$

де Λ – період мікрозгину.

Однак моди вищих порядків (велике значення m) взаємодіють при малому значенні Λ , тоді як моди нижчих порядків (мале значення m) взаємодіють при великому значенні Λ , це добре видно на рис. 1.7.

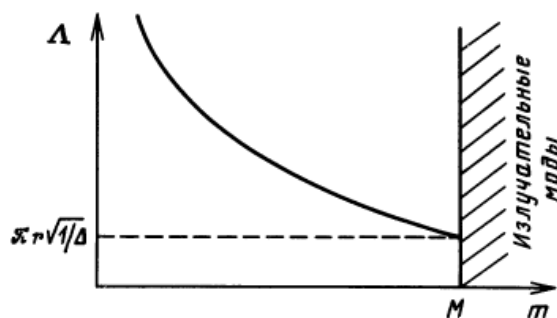


Рисунок 1.7 – Залежність необхідної періодичності мікрोगринів для з'єднання суміжних мод від номера моди (для ВС зі ступінчастим профілем показника заломлення)

Модулятори, засновані на керованому з'єднанні хвилеводів з паралельним розташуванням, є дуже перспективним типом оптичних сенсорів, які мають високу чутливість до зміни оптичних властивостей матеріалу. Хоча амплітудні датчики на основі модуляції випромінювання зі змінним коефіцієнтом поглинання середовища характеризуються простотою конструкції, область їх використання обмежена лише змінами температури, дози випромінювання та напруженості електричного поля. Це пов'язано з відсутністю матеріалів, які ефективно змінюють своє поглинання при зовнішніх фізичних діях. Але для вимірювання переміщення, сили і тиску використовуються датчики відбивно-пропускаючого типу. Вони володіють хорошою лінійністю, можуть використовувати багатомодові оптичні волокна, що дає можливість значно знизити втрати зв'язку.

Незважаючи на характерні недоліки, датчики на основі порушення повного внутрішнього відбиття мають високу чутливість, дозволяють використовувати одноразове відображення, що значно зменшує габарити приладу.

1.2.4 Датчик зі змінним стрибком показника на межі світловода

Однією із областей застосування датчиків зі змінним кроком показника заломлення на основі спрямованого світловоду є ідентифікація типу рідини за

значенням показника заломлення, що необхідно для великої кількості практичних завдань, наприклад при виявленні конденсату в паливних баках літаків тощо [14]. Основне використання цих рідинних індикаторних датчиків засноване на різниці в показниках заломлення n_2 контрольованих рідин (наприклад, для води $n_2 = 1,33$, для гасу $n_2 = 1,41$, що призводить до зміни світлопроникності. оптичного каналу (рис. 1.8).

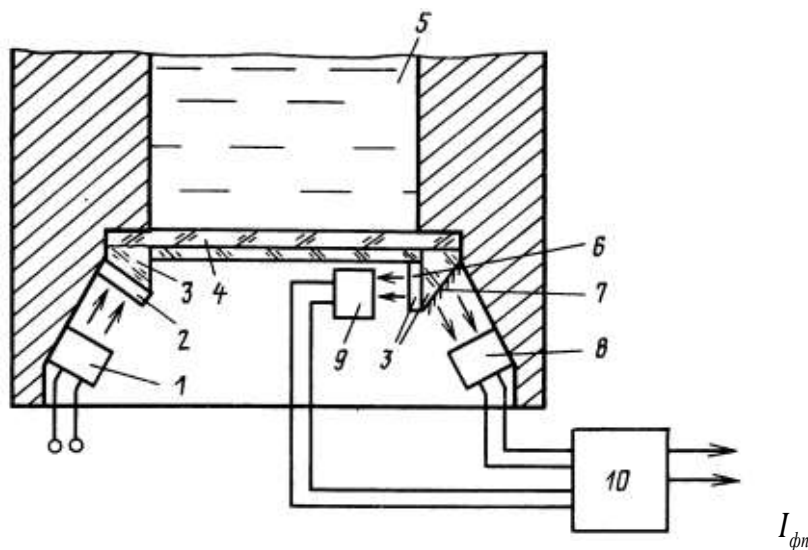


Рисунок 1.8 – Індикатор комбінованого типу рідини

Індикатор містить елементи: 1 – джерело випромінювання, 2 – поляризатор, 3 – вхідна призма, 4 – плоский пружний світловод, 5 – контрольована рідина, 6 – аналізатор, 7 – світлопрозоре покриття, 8,9 – фотоприймач, 10 – калькулятор.

Спочатку при зануренні індикатора в рідину на поверхні світловода утворюються ділянки з рідиною, які згодом об'єднуються в суцільну плівку. Це призведе до стрибків поточного $I_{\text{фр}}$. Наступне занурення не призводить до різких стрибків і провалів поточного $I_{\text{фр}}$, він починає монотонно знижуватися. Значення стрибків і падінь в початковий період визначаються формою краплі і положенням поверхні розділу крапля-повітря. Починаючи з деякого рівня h_0 , струм $I_{\text{р}}$ практично не змінюється зі збільшенням рівня h , оскільки межа відбиття контрольованого середовища повітря знаходиться досить далеко від вимірювальної поверхні індикатора, а сигнал, відбитий від цієї межі, повністю

ослаблений. Така річ, як температурний фактор, має велике значення в сенсорній системі,

Підвищення достовірності інформації можна досягти при ідентифікації рідин не тільки за показником заломлення, а й за густиною [15].

Для індикаторів цього типу потік випромінювання від джерела випромінювання, що пройшов через поляризатор і вхідну призму, потрапляє в плоский пружний світловод і поширюється по ньому шляхом повних внутрішніх відбиттів від напрямних площин. На вихідній поверхні призми виведення випромінювання потік випромінювання розділяється надвоє за допомогою напівпрозорого покриття 7. Частина струму, що пройшла через напівпрозоре покриття, потрапляє на фоторецептор, а частина, що відбивається від нього, проходить через аналізатор і досягає фоторецептора.

Для датчиків на основі ПВВ стан поляризації залежить від ваги шару контрольованої рідини над світловодом і визначається його щільністю. Аналізатор 6 і додатковий фотоприймач дозволяють виділити сигнал, який залежить як від показника заломлення рідини, так і від її щільності. Калькулятор дозволяє вибрати два сигнали, що відповідають показнику заломлення і щільності контрольованої рідини.

При роботі рідинного індикатора в умовах вібрації необхідно враховувати релаксаційні процеси. При різкій зміні показника заломлення зміна струму фотоприймача визначається співвідношенням:

$$I_{\phi n}(t) = n_2(t) S_{i_{жк}} (1 - \exp(-t / \tau_{u.жк})), \quad (1.11)$$

$$\text{де } n_2(t) = \begin{cases} 1,33t \text{ при } < 0 \\ 1,41t \text{ при } \geq 0 \end{cases}$$

$S_{i_{жк}}$ це коефіцієнт для цього випадку, який визначається виразом, який можна записати у вигляді постійної суми:

$$\tau_{u.жк} = \tau_{\phi n} + \tau_{o.к}, \quad (1.11)$$

де $\tau_{\phi n} \approx 10^{-4} \div 10^{-8} \text{ c}$;

$\tau_{o.k}$ – постійна часу фотоприймача.

Вираз для постійного часу $\tau_{o.k}$ можна отримати шляхом аналізу процесу витікання рідини з поверхні оптичного волокна довжиною L і товщиною d_c , встановленого під кутом α_{yct} до поверхні рідини. Коли основна маса рідини витікає з прискоренням α_g :

$$\tau_{o.k} \approx 0,455 \sqrt{\frac{L d_c \sqrt{1 - \cos^2(2\vartheta)}}{d_e \alpha_g \cos \alpha_{yct} \sqrt{1 - \cos^2(2\vartheta)} - 2k_{mp} g R_e \cos \alpha_{yct}}}, \quad (1.12)$$

де g – прискорення сили тяжіння;

k_{mp} - коефіцієнт тертя;

$\vartheta = (\sigma_{23} \sigma_{13}) / \sigma_{12}$ – кут змочування.

Коли межа розділу середовища паралельна, є ділянка з коливальними змінами $I_{\phi n}$. Ці коливання, викликані, наприклад, коливаннями в результаті коливань крапель рідини, що залишаються на поверхні світловода, виникають лише в кінці перехідного процесу перетікання основної маси рідини і утворення крапель.

Щоб домогтися зменшення постійної часу оптичного каналу індикатора, в місцях скупчення крапель також можна розміщувати спеціальні, наприклад, конічні стекери. На рис. 1.9 показана залежність постійної часу оптичного каналу $\tau_{(o.k)}$ від кута нахилу α_{yct} в різних значеннях Δn_2 .

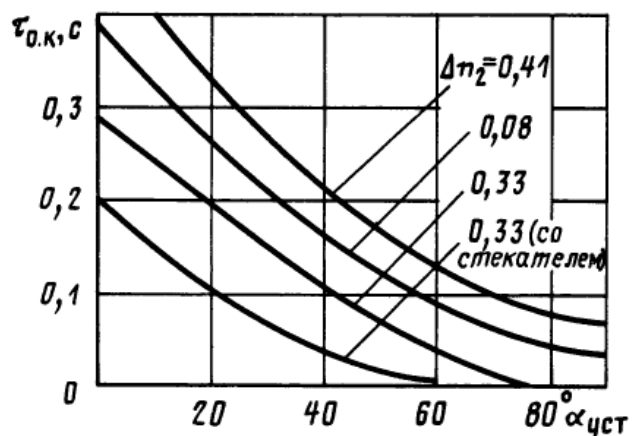


Рисунок 1.9 – Криві релаксації датчика при різних значеннях Δn_2

Типовий датчик на основі ПВВ може мати невеликі розміри ($40 \times 40 \times 20$) мм і вагу близько 100 г з високою чутливістю і низьким енергоспоживанням (близько 100 мВт). Індикатор зберігає працездатність в широкому діапазоні температур (від -40 °С до $+60$ °С). Підвищення чутливості можна досягти шляхом введення зворотного зв'язку між фоторецептором і керованим оптичним волокном (рис. 1.10) [16].

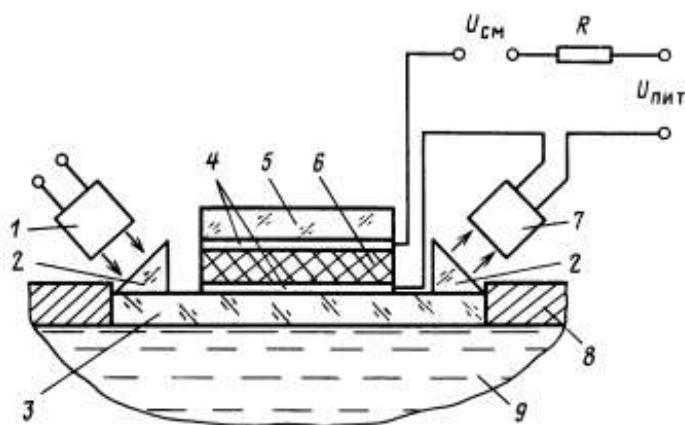


Рисунок 1.10 – Датчик зворотного зв'язку

До складу датчика зі зворотним зв'язком входять: 1 – випромінювач; 2 – вхідно-вихідні призми; 3 – світловод; 4 – прозорі електроди; 5 – дошка; 6 –

електрооптичний матеріал; 7 – фотодіод; 8 – корпус; 9 – контрольоване середовище.

1.2.5 Датчик магнітного поля

За допомогою магнітного поля можна контролювати роботу ряду систем управління. Існують індуктивні датчики, датчики Холла, вихідний сигнал яких залежить від величини і напрямку прикладеного поля. Загальними недоліками цих перетворювачів є малі значення вихідних сигналів, необхідність видалення показаного потенціалу з області вимірювання, слабкий опір і наявність рухомих частин (для індукційних датчиків).

Давайте розглянемо конструкцію і процес створення такого датчика. При створенні такого сенсора на поверхню оптичного волокна наноситься плівка з магнітооптичного матеріалу з показником заломлення, нижчим, ніж у оптичного волокна. Принцип дії датчика магнітного поля (ДМП) полягає в зміні показника заломлення магнітооптичного матеріалу під дією магнітного поля: у випадку, коли вектор намагніченості магнітного матеріалу має проекцію на напрямок поширення оптичних хвиль швидкість поширення поляризованих хвиль, а отже, і їх показник заломлення, різні. Зміна показника заломлення визначається властивостями використовуваного матеріалу і пропорційна компоненті вектора намагніченості вздовж поширення оптичного променя. . Якщо у вихідному стані плівка магнітооптичного матеріалу намагнічена перпендикулярно до площини падіння світла, то показник заломлення для обох циркулярно поляризованих хвиль однаковий і дорівнює n_2 . Матеріал світловода з показником заломлення n_1 і кут введення підбирають так, щоб для променя світла, що поширюється у світловоді, на межі з плівкою спостерігалася ПВВ:

$$\sin \theta_1 \geq n_2 / n_1. \quad (1.13)$$

Для прозорих матеріалів при кутах падіння, що відповідають умові ПВВ, коефіцієнт відбиття світлової хвилі дорівнює 100%. Однак магнітооптичні

матеріали мають поглинання. Якщо ми прикладаємо магнітне поле в напрямку поширення світла, вектор намагніченості в плівці починає обертатися. Кут повороту вектора пропорційний величині зовнішнього магнітного поля. При цьому змінюються показники заломлення хвиль правої і лівої циркулярної поляризації:

$$n_2^+ = n_2 + \Delta n_2; n_2^- = n_2 - \Delta n_2. \quad (1.14)$$

Для прямого циркулярно поляризованого променя умова ПВВ порушується, оскільки $\sin\theta_1 < (n_2 + \Delta n_2) / n_1$. Для створення керованого магнітного поля на поверхню плівки прикладається система провідників. У плівці товщиною 2 мкм струм 50 мА створює керуюче магнітне поле напруженістю до 3000 А/м. Швидкість перемагнічування плівки може досягати кількох одиниць наносекунд. ДМП найлегше реалізувати за допомогою рідкого кристала, розміщеного між світловодом і покривним склом. У випадку, коли поверхнєве скло виготовлено з полірованої пластини і немає можливості повернути світло, що пройшло через рідкий кристал, назад до світловоду, функція перетворення датчика має негативний градієнт. Товщина оптичного волокна істотно впливає на чутливість датчика магнітного поля. Товщина світловода, яка легко досягається при стандартній технології виготовлення оптичних деталей, дозволяє отримувати світловоди товщиною менше 0,1 мм. Число відображень в таких оптичних волокнах може бути більше 10. Цього достатньо для зміни вихідного сигналу на 80-95%, що забезпечує чутливість такого ДМП в одиницях вольт на тесла. Це на порядок перевищує чутливість таких поширених вимірювачів магнітного поля, як датчики Холла [17].

1.3 Датчик типу рідини

Принцип дії рідкого ВОД полягає в реєстрації змін параметрів оптичних сигналів, що поширюються по оптичному волокну, оптичні властивості якого

залежать від зовнішніх впливів. Даний датчик працює на основі ВУС і використовується для визначення типу рідини за значенням показника заломлення, що дуже важливо для більшості практичних завдань, наприклад, виявлення конденсату в паливних баках літаків [18–20]. Робота індикатора рідинного типу заснована на різниці показників заломлення n_2 контрольованих рідин (наприклад, для води $n_2 = 1,33$, для гасу $n_2 = 1,41$), які призводять до зміни світлопропускання оптичного каналу. .

При зміні показника заломлення контрольованої рідини змінюється світловий сигнал на фотоприймачі, що призводить до зміни напруги розряду, що сприяє ще більшій зміні світлового сигналу, що надходить на фотоприймач, до встановлення рівноважного стану. Таким чином, сигнал, отриманий від навантаження, створює подальше падіння вихідного сигналу, змінюючи смугу пропускання оптичного волокна в тому ж напрямку, що й контрольоване середовище. Це забезпечує збільшення зміни вихідного сигналу при однаковій зміні показника заломлення контрольованого середовища. Максимальна чутливість індикатора типу рідини досягається при його роботі в релейному режимі (індикація тільки двох типів рідин). Точність індикатора рідинного типу визначається його чутливістю. Індикатор типу рідини дозволяє розрізняти рідини, які мають схожі фізичні властивості та показник заломлення, що відрізняється на соті та тисячні частки. Чутливість індикатора рідинного типу визначається чутливістю фоторецептора, глибиною модуляції світлового потоку в світловоді і глибиною позитивного зворотного зв'язку. Глибина модуляції залежить від геометрії оптичного волокна і кута поширення випромінювання. Глибина позитивного зворотного зв'язку визначається величиною опору навантаження і модуляційної характеристики електрооптичної речовини. що дає можливість збільшити чутливість в 10 разів. Цей пристрій найбільш ефективно використовується в авіації для електричного моніторингу рідкого стану в паливних баках літаків, особливо в релейному режимі, наприклад, для виявлення води в газі, яка змінюється в сотих і тисячних частках. Чутливість індикатора рідинного типу визначається чутливістю фоторецептора, глибиною модуляції світлового потоку в світловоді і глибиною позитивного зворотного зв'язку.

Глибина модуляції залежить від геометрії оптичного волокна і кута поширення випромінювання. Глибина позитивного зворотного зв'язку визначається величиною опору навантаження і модуляційної характеристики електрооптичної речовини. що дає можливість збільшити чутливість в 10 разів. Цей пристрій найбільш ефективно використовується в авіації для електричного моніторингу рідкого стану в паливних баках літаків, особливо в релейному режимі, наприклад, для виявлення води в газі, яка змінюється в сотих і тисячних частках. Чутливість індикатора рідинного типу визначається чутливістю фоторецептора, глибиною модуляції світлового потоку в світловоді і глибиною позитивного зворотного зв'язку. Глибина модуляції залежить від геометрії оптичного волокна і кута поширення випромінювання. Глибина позитивного зворотного зв'язку визначається величиною опору навантаження і модуляційної характеристики електрооптичної речовини. що дає можливість збільшити чутливість в 10 разів. Цей прилад найбільш ефективно використовується в авіації для електричного контролю стану рідини в паливних баках літаків, особливо в релейному режимі, наприклад, для виявлення води в газі, глибини модуляції світлового потоку в світловоді, глибини позитивний відгук. Глибина модуляції залежить від геометрії оптичного волокна і кута поширення випромінювання. Глибина позитивного зворотного зв'язку визначається величиною опору навантаження і модуляційної характеристики електрооптичної речовини. що дає можливість збільшити чутливість в 10 разів. Цей прилад найбільш ефективно використовується в авіації для електричного контролю стану рідини в паливних баках літаків, особливо в релейному режимі, наприклад, для виявлення води в газі, глибини модуляції світлового потоку в світловоді, глибини позитивний відгук. Глибина модуляції залежить від геометрії оптичного волокна і кута поширення випромінювання. Глибина позитивного зворотного зв'язку визначається величиною опору навантаження і модуляційної характеристики електрооптичної речовини. що дає можливість збільшити чутливість в 10 разів. Цей прилад найбільш ефективно використовується в авіації для електричного контролю стану рідини в паливних баках літака, особливо в релейному режимі, наприклад, для виявлення води в газі, що дозволяє збільшити чутливість в 10 разів. Цей прилад найбільш ефективно

води в газі, що дозволяє збільшити чутливість в 10 разів. Цей прилад найбільш ефективно використовується в авіації для електричного контролю стану рідини в паливних баках літака, особливо в релейному режимі, наприклад, для виявлення води в газі, що дозволяє збільшити чутливість в 10 разів. Цей пристрій найбільш ефективно використовується в авіації для електричного моніторингу рідкого стану в паливних баках літаків, особливо в релейному режимі, наприклад, для виявлення води в газі [21–23]. На рис. 1.11 зображено індикатор рідинного типу.

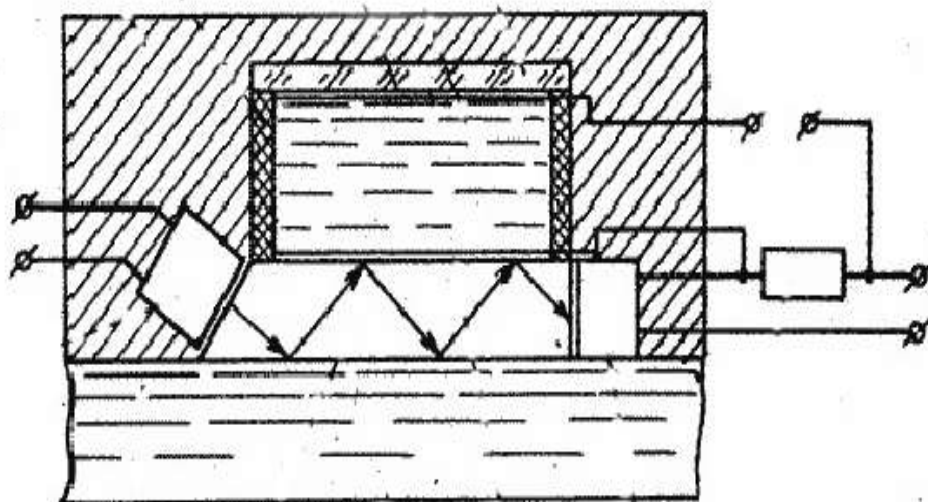


Рисунок 1.11 – Індикатор типу рідини

Цей індикатор рідинного типу містить послідовно розташоване джерело випромінювання та плоский світловод, що контактує з досліджуваним середовищем. Для підвищення точності ідентифікації типу рідини виготовляють плоский світловод з лінійно зменшуваним показником заломлення від входу в нього і оснащений призми виходу випромінювання і світловодами. Призми виведення випромінювання розміщені одна за одною на поверхні плоского оптичного волокна, яке не контактує з навколишнім середовищем, а волоконно-оптичні волокна з'єднані одним кінцем з вихідними поверхнями призми виведення випромінювання. На рис. 1.12 показано модифікацію конструкції датчика [24].

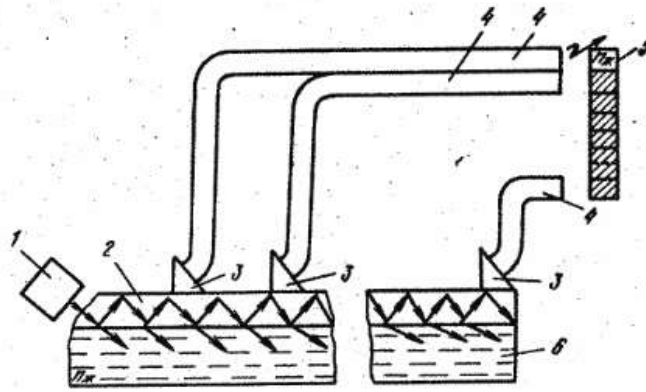


Рисунок 1.12 – Конструкція датчика рідинного типу

Конструкція датчика складається з наступних компонентів: 1 – джерело випромінювання, 2 – плоский світловод, 3 – призми для виведення випромінювання, 4 – оптоволоконні провідники, 5 – індикаторна шкала, 6 – контрольована рідина.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДАТЧИКА НА ОСНОВІ ПВВ

Для складання вимірювача датчик концентрації цукру у водному розчині світлопровідна структура з порушенням повного внутрішнього відбиття (ПВВ) світла на межі розділу світловод і зовнішнє середовище (рис. 2.1), що виникає при зміні показника заломлення зовнішнього середовища, є перспективний. Ця зміна також може відбуватися в результаті світлових, електричних, магнітних, теплових, механічних та інших видів впливу. Зміна коефіцієнта світлопропускання світлопровідної структури при розриві ПВВ призводить до отримання корисної інформації про зовнішній вплив на світлове випромінювання, яке змінює n_2 .

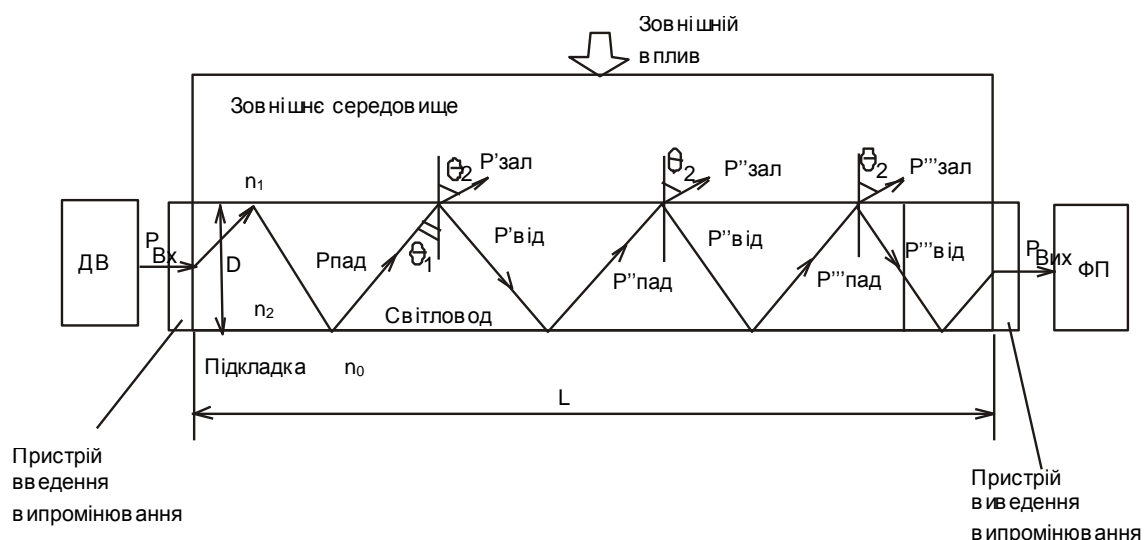


Рисунок 2.1 – Схема модуляції світла розривом ПВВ у світловоді

У цих приладах використовуються світлопровідні структури, товщина яких значно перевищує довжину хвилі випромінювання. Амплітудна модуляція спостерігається при порушенні повного внутрішнього відбиття від межі несучого шару. У цій конструкції досягається ефективне управління світловим пучком, що дозволяє працювати з джерелами некогерентного випромінювання (ДВ), з невеликими змінами показників заломлення матеріалів.

Нехай поширення випромінювання у світлопровідній структурі з n_1 за відсутності зовнішнього впливу на граничне з нею середовище відбувається шляхом повних внутрішніх відбиттів від межі світлопровідної підкладки (n_1) і світловод-зовнішнє середовище (n_2). Кут θ_1 виберемо рівним критичному куту повного внутрішнього відбиття (ПВВ) $\theta_{1кр}$. Припустимо, що n_2 більше за n_0 , але менше n_1 . Тоді

$$\theta_1 = \theta_{1кр} = \arcsin(n_{20} / n_1) \quad (2.1)$$

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

Припустимо також, що якийсь вплив на зовнішнє середовище (n_{20}) призведе до збільшення його показника заломлення на σn_2 і тому умова PVV не підтримуватиметься на межі розділу між оптичним волокном і зовнішнім середовищем, у якому $\theta_1 < \theta_{1кр}$. При цьому, згідно з формулами Френеля та обраними початковими умовами, потужність променя, відбитого від межі оптичне волокно – середовище:

– для перпендикулярної поляризації:

$$P_{від} = P_{над} \left[\frac{1 - \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{1 + \sqrt{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2, \quad (2.2)$$

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

аналогічно для еквідистантної поляризації:

$$P_{від} = P_{над} \left[\frac{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} - \sqrt{\frac{[(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2]}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} + \sqrt{\frac{[(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2]}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2, \quad (2.3)$$

для природного освітлення:

$$P_{від} = 0.5 \cdot \left[\frac{1 - \sqrt{\frac{[(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2]}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{1 + \sqrt{\frac{[(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2]}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2 \left[\frac{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} - \sqrt{\frac{[(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2]}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}}{\frac{(n_{20} + \sigma n_2)^2}{(n_1)^2} + \sqrt{\frac{[(n_{20} + \sigma n_2)^2 - (n_{20})^2]}{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}} \right]^2. \quad (2.4)$$

При цьому потужність заломленого променя:

$$P_{прел} = P_{над} - P_{від} \quad (2.5)$$

Розподіл світлової енергії між заломленим і відбитим пучком за формулами (2.2) – (2.4) відбувається при кожному відбитті від межі модульованого середовища. Звідси і маркування $P_{від}^{(\kappa)} = P_{вих}$, $P_{над} = P_{вх}$, з формул (2.2) – (2.4) отримуємо:

для перпендикулярної поляризації:

$$P_{вих} = P_{вх} [R_{\perp}(n_{20} + \sigma n_2)]^k, \quad (2.6)$$

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

для паралельної поляризації:

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{вх}} [R_{\parallel}(n_{20} + \sigma n_2)]^k, \quad (2.7)$$

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

для природного освітлення:

$$P_{\text{вих}} = 0.5 \cdot P_{\text{вх}} \left[(R_{\perp})^k (n_{20} + \sigma n_2) + (R_{\parallel})^k (n_{20} + \sigma n_2) \right]. \quad (2.8)$$

Для направленої плоского оптичного волокна довжиною L і товщиною d кількість відбиттів є цілим числом:

$$k = \text{entier} \left(\frac{L}{2d \cdot \tan(\theta_1)} \right) \quad (2.9)$$

при початкових умовах:

$$k = \text{entier} \left(L \frac{\sqrt{(n_1)^2 - (n_{20})^2}}{2d \cdot n_{20}} \right). \quad (2.10)$$

2.1 Волоконно-оптичні датчики із граничною модуляцією оптичного випромінювання (рівномірний та ламбертовский розподіл інтенсивності випромінювання)

При використанні в якості чутливого елемента плоского оптичного волокна існує ряд вимог до компонентів перетворювача. Ці вимоги пов'язані з використанням схеми модуляції, глибина якої є критичною для кута поширення випромінювання, а також з тим, що фотоприймач (ФП) і джерело випромінювання (ДВ) розділені світлопровідною структурою. . , довжина якого може досягати декількох сантиметрів. Якщо на межі світлопровідного шару використовується схема модуляції зі зміною відносного показника заломлення, то необхідно узгодити не тільки спектральні характеристики елементів, а й ДС джерела випромінювання з його взаємним розташуванням в відношення до контрольованої світлопровідної структури. Це пояснюється високою чутливістю схеми до кута падіння випромінювання в світловоді.

Існує залежність між зміною показника заломлення зовнішнього середовища n_2 , необхідні для 100% модуляції світлового потоку і розбіжності створюваного випромінювачем променя. При цьому чим менше змінюється показник заломлення, тим менше розбіжність променя. Вимоги до розбіжності променя пов'язані з тим, що вихідна потужність залежить від кутів падіння $\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}$ світлового випромінювання на модульовану межу світловода (рис. 2.2).

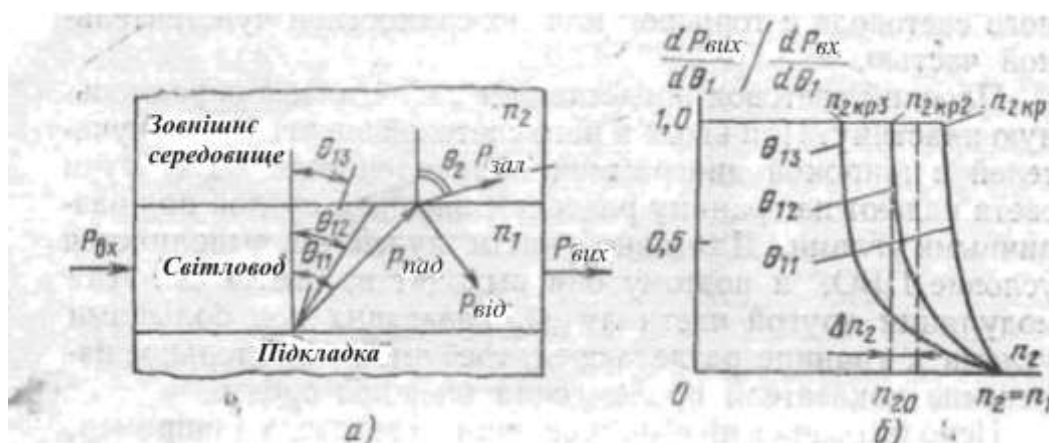


Рисунок 2.2 – Розрахунок світлопроникності світлопровідної конструкції

Відповідно до кута θ_1 , а також від показника заломлення n_2 в залежності від зовнішнього регулюючого впливу буде змінюватися і відносне значення вихідної потужності:

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

де $dP_{\text{вх}} / d\theta_1$ – частина потужності, що прикладається під час відкриття плоского кута $d\theta_1$.

Відносна вихідна потужність при числі відображень k для:
перпендикулярна поляризація

$$\frac{dP_{\text{вих}} / d\theta_1}{dP_{\text{вх}} / d\theta_1} = [R_{\perp}(\theta_1, n_2)], \quad (2.11)$$

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

паралельна поляризація

$$\frac{dP_{\text{вих}} / d\theta_1}{dP_{\text{вх}} / d\theta_1} = [R_{\parallel}(\theta_1, n_2)], \quad (2.12)$$

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

природне освітлення

$$\frac{dP_{\text{вих}} / d\theta_1}{dP_{\text{вх}} / d\theta_1} = \frac{1}{2} [R_{\perp}^k(\theta_1, n_2) + R_{\parallel}^k(\theta_1, n_2)]. \quad (2.13)$$

де α_0 – кут при основі вхідної призми.

При введенні випромінювання через повітряний проміжок між випромінювачем і призмою і $n_3=n_1$, враховуючи формули Френеля і закон Снеліуса, ДС у світловоді можна записати через випромінювач ДС:

$$\frac{dP_{ex}}{d\theta_1} = 0,5[T_{\perp B} + T_{\parallel B}]f_1\{\arcsin[n_1 \sin(\theta_1 - \alpha_0)]\} \quad (2.17)$$

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

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

Пропускання поверхні розділу повітря-призма для перпендикулярних і паралельних площин поляризації світла; $\theta_1' = \theta_1 - \alpha_0$.

Коефіцієнт пропускання світла через світловод для широкого випромінювача ДС:

$$\tau = \frac{P_{вух}}{P_{ex}} = \frac{1}{P_{ex}} \int_{\theta_{1min}}^{\theta_{1max}} \frac{dP_{вух}}{d\theta_1} d\theta_1 \quad (2.18)$$

де $\theta_{1max}, \theta_{1min}$ – граничні кути падіння випромінювання на межу модульованого волокна за рахунок ДС у волокні:

$$\frac{dP_{вух}}{d\theta_1} = \frac{1}{2} \left[R_{\perp}^k(\theta_1, n_2) \frac{dP_{ex\perp}}{d\theta_1} + R_{\parallel}^k(\theta_1, n_2) \frac{dP_{ex\parallel}}{d\theta_1} \right] \quad (2.19)$$

Кути θ_{1max} і θ_{1min} визначаються шириною DN радіатора, яка характеризується кутом $\pm \theta_{max}$:

$$\theta_{1max} = \alpha_0 + \arcsin\left(\frac{\sin \varphi_{max}}{n_1}\right) \quad (2.20)$$

$$\theta_{1max} = \alpha_0 - \arcsin\left(\frac{\sin \varphi_{max}}{n_1}\right) \quad (2.21)$$

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

Коефіцієнт модуляції світлового сигналу:

$$m = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} = 1 - \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}}, \quad (2.22)$$

де P_{max} – максимальна потужність;

P_{min} – мінімальна потужність;

$\tau_{гойдалка}$ – максимальний коефіцієнт передачі потужності;

$\tau_{хв}$ – максимальний коефіцієнт передачі потужності.

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

$$P_{max} = \int_{\theta_{1min}}^{\theta_{1max}} \frac{dP_{eux}}{d\theta_1} d\theta_1 |_{n_2=n_{20}}. \quad (2.23)$$

Даний інтеграл можна розділити на дві частини:

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

умова РВВ:

$$\frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} = \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} .$$

2) в діапазоні кутів від $\theta_{1\min}$ на $\theta_{1\text{кр}}$ умова РВВ не виконується, отже:

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

Так,

$$P_{\max} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} \left[R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}) \right] d\theta_1 + \int_{\theta_{1\text{кр}}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1 . \quad (2.24)$$

Подібним чином визначається P_{\min} :

$$P_{\min} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1 \Big|_{n_2 = n_{20} + \Delta n_2}, \quad (2.25)$$

або

$$P_{\min} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}\Delta}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} \left[R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20} + \Delta n_2) \right] d\theta_1 + \int_{\theta_{1\text{кр}\Delta}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{вх}}}{d\theta_1} d\theta_1, \quad (2.26)$$

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

Якщо випромінювач має ламбертівську інтенсивність випромінювання в діапазоні кутів від θ_{11} на θ_{12} , Це є:

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

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

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

$$m = \frac{\int_{\theta_{1kp}}^{\theta_{1kp\Delta}} \frac{dP_{ex}}{d\theta_1} d\theta_1 + \int_{\theta_{1min}}^{\theta_{1kp}} \frac{dP_{ex}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20})] d\theta_1 - \int_{\theta_{1min}}^{\theta_{1kp}} \frac{dP_{ex}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20} + \Delta n_2)] d\theta_1}{\int_{\theta_{1kp}}^{\theta_{1max}} \frac{dP_{ex}}{d\theta_1} d\theta_1 + \int_{\theta_{1min}}^{\theta_{1kp}} \frac{dP_{ex}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20})] d\theta_1} \quad (2.27)$$

Формула (2.27) з урахуванням даного випромінювача постійного струму дає змогу визначити реальний коефіцієнт модуляції m у досліджуваній схемі.

2.2 Розрахунок параметрів датчика концентрації цукру на основі ПВВ

Як показав огляд літератури, показник заломлення водного розчину цукру є функцією концентрації. Результати експериментальних досліджень [23] залежності показників заломлення водних розчинів цукру при 200 С від концентрації розчину наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Залежність показника заломлення водного розчину від концентрації цукру

З(%)	n	З(%)	n	З(%)	n	З(%)	n
0	1,3330	10	1,3479	35	1,3902	60	1,4418
2	1,3359	15	1,3557	40	1,3997	65	1,4532
4	1,3388	20	1,3639	45	1,4096	70	1,4651
6	1,3418	25	1,3723	50	1,4200	75	1,4774
8	1,3448	30	1,3811	55	1,4307	80	1,4901

(С(%) — масова частка цукру в розчині).

З використанням математичного пакету MathCad14 згідно з алгоритмами (2.1 – 2.22) розроблено програму для розрахунку коефіцієнта модуляції m при проходженні пучка по керованому світловоду з водним розчином цукру. Програма розрахунку наведена в додатку.

З урахуванням залежностей (2.2 – 2.27) для розрахунку датчика були задані наступні вихідні дані:

n_{2v} – показник заломлення водного середовища з розрахунку цукру для ($C=\%$);

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

$n_{2v}(v) = n_{20} + \Delta_n v$;

$\Delta_n = 0,05$;

$v = 0..3$,

На основі цього визначається показник заломлення оптичного волокна n_1 було обрано саме 1.9.

$n_1 = 1,65; 1,9$ – показник заломлення оптичного волокна

$k=1-3$ – кількість показів;

$\theta_{1кр}(v, n_1) = \text{asin}\left(\frac{n_{2v}(v)}{n_1}\right) \cdot \frac{\text{deg}}{\text{deg}}$ – критичний кут, що відповідає показнику

заломлення $n_{2v}(v)$;

$\alpha_0 = 10\text{deg}, 20\text{deg}..80\text{deg}$ – кут при основі вхідної призми;

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

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

Випромінювач має рівномірну інтенсивність випромінювання. Відносна сила випромінювання $P_0 = 1$.

У нашому випадку основним параметром для розрахунку є коефіцієнт модуляції m , який характеризує рівень зміни вихідної потужності з показник заломлення водного середовища цукру n_{2v} концентрація C . Цей параметр $m(\alpha_0, v, \phi_{\max}, n_1, k)$ також залежить від: кута при основі вхідної призми α_0 , n_{2v} показник

заломлення водного середовища, максимальний кут $DS\phi_{\max}$, а також кількість відбиттів променя k .

Проаналізовано вплив кута при основі вхідної призми α_0 від коефіцієнта модуляції m для різних значень максимального кута $DS\phi_{\max}$, а також три значення концентрацій $C1 = 32\%$ а $C3 = 77\%$. Типові значення ϕ_{\max} DS для стандартних світлодіодів знаходяться в діапазоні $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$. Результати розрахунку $m(\alpha_0)$ для двох значень концентрацій $C1 = 37\%$ а $C2 = 77\%$ показано нижче (рис. рис. 2.5 –2.9)

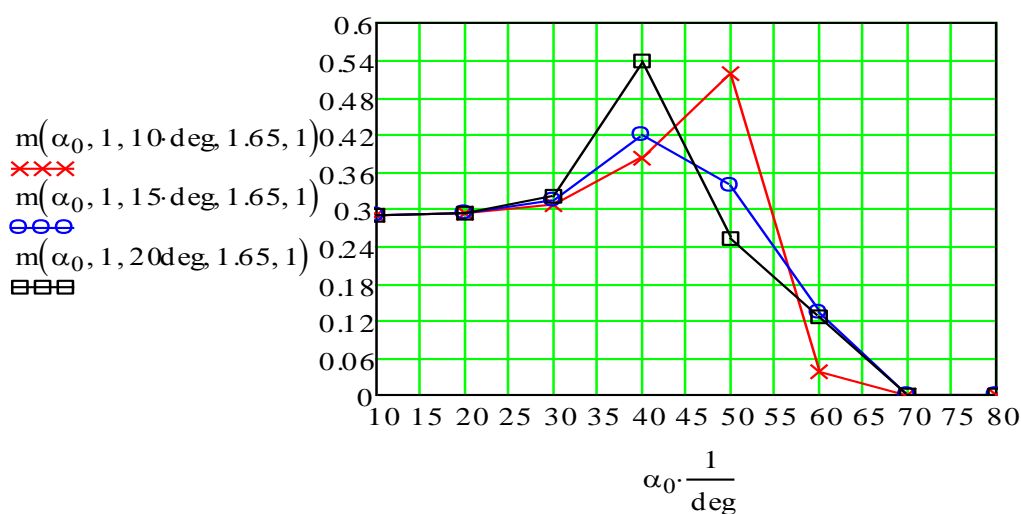


Рисунок 2.5 – Залежність коефіцієнта модуляції m від куточок α_0 для різних кутів $DS\phi_{\max}$ ($C=32\%$, $n_1=1,65$, $k=1$)

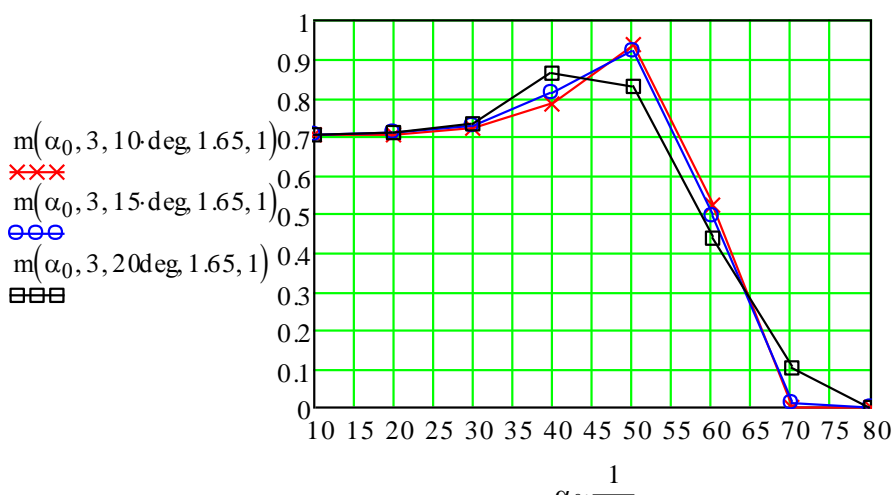


Рисунок 2.6 – Залежність коефіцієнта модуляції m від куточок α_0 для різних кутів $DS\phi_{\max}$ ($C=77\%$, $n_1 = 1,65$; $k = 1$)

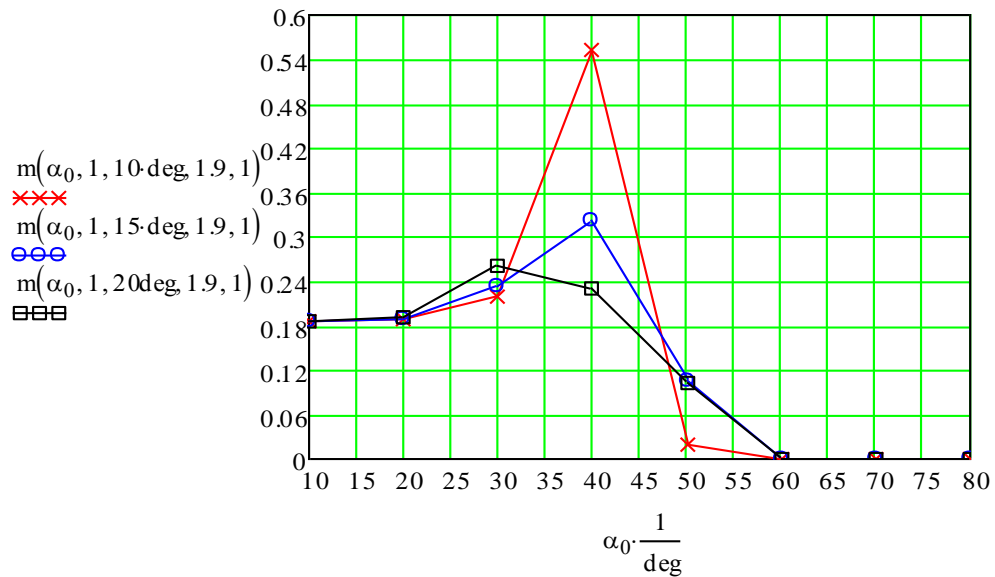


Рисунок 2.7 – Залежність коефіцієнта модуляції m від куточок α_0 для різниркути ДС ϕ_{\max} ($3 = 32\%$, $n_1 = 1.9$; $k = 1$)

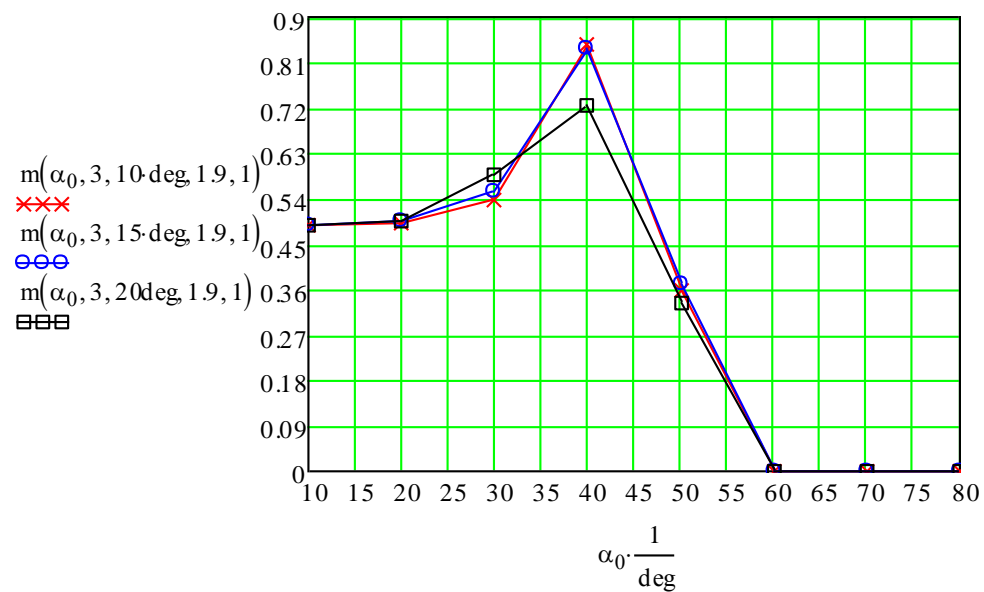


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта модуляції m від куточок α_0 для різниркути ДС ϕ_{\max} ($3 = 77\%$, $n_1 = 1.9$; $k = 1$)

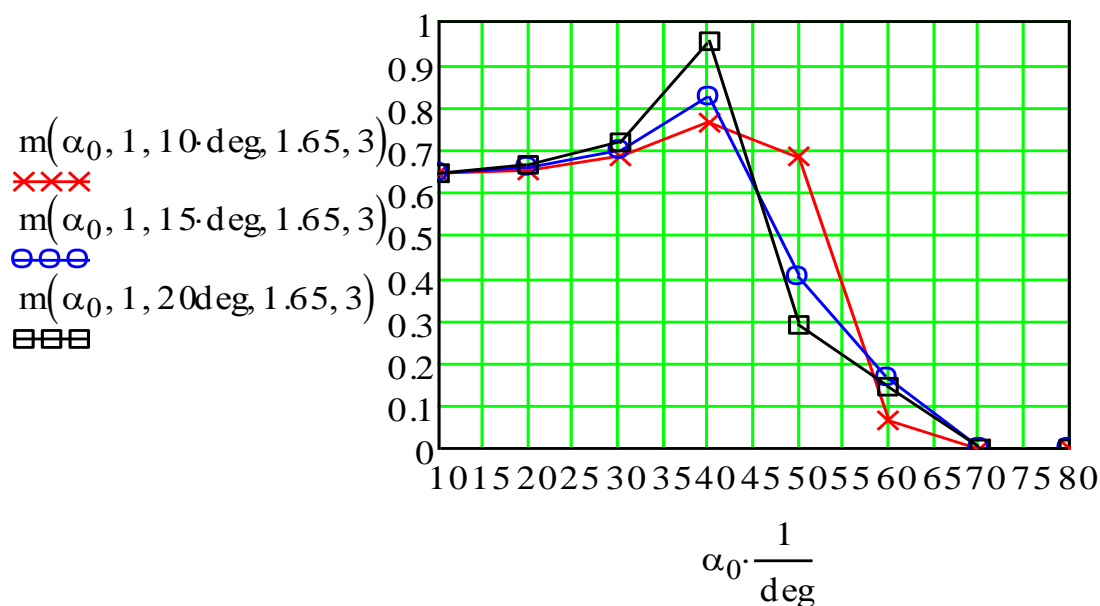


Рисунок 2.9 – Залежність коефіцієнта модуляції m від кутів α_0 для різних кутів ДС ϕ_{\max} ($C = 32\%$, $n_1 = 1,65$; $k = 3$)

Як видно з рис. 2.4 – 2.8 ці залежності мають резонансний характер, який сильніше проявляється при вимірюванні малих значень концентрацій до $C = 32\%$ ($k = 1$). Оптимальними кутами біля основи призми при вимірюванні концентрації цукру в усьому діапазоні $C = 0 - 80\%$ є $40^\circ - 50^\circ$. Чутливість датчика можна підвищити збільшенням числа відображень $k = 3$ і його довжини. Однак у цьому випадку (рис. 2.9) коефіцієнт модуляції близький до 1, що призводить до необхідності працювати з низьким рівнем оптичного сигналу.

При виборі волоконно-оптичної структури велике значення $n_2 = 1.9$ резонансні властивості $m(\alpha_0)$ виділено (рис. 2.6 – 2.8), вимоги до кута при основі призми є критичними, а оптимальний кут при основі призми точно такий же при вимірюванні концентрації цукру у всьому діапазоні $C = 0 - 80\%$, $\alpha_0 = 40^\circ$.

ВИСНОВКИ

Розглянуто фізичні принципи роботи датчика на основі повного внутрішнього відбиття. Проведено аналіз типів оптичних датчиків фізичних величин на основі керованих світлопровідних структур.

Аналітична математична модель датчика на основі ПВВ Отримано аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнтів модуляції датчика. Задати вхідні дані для розрахунку датчика; граничні кути призми, показники заломлення світлопровідної структури, діапазон попередніх значень концентрації, кути оптичного ДН волокна.

Проаналізовано вплив кута при основі вхідної призми на коефіцієнт модуляції m для різних значень максимального кута ДН. Виявилось, що ці залежності мають резонансний характер, який сильніше проявляється при вимірюванні малих значень концентрацій до $C = 37\%$ ($k = 1$). Оптимальними кутами при основі призми при вимірюванні концентрації цукрів у всьому діапазоні $C = 0-80\% \in \alpha_0 = 40^\circ - 50^\circ$.

Показано, що чутливість датчика можна збільшити шляхом збільшення його довжини (кількості відображень k). Однак у цьому випадку коефіцієнт модуляції близький до 1, що призводить до необхідності працювати з низьким рівнем оптичного сигналу.

Виходить, що при виборі світлопровідної конструкції з великим значенням $n_2 = 1.9$ резонансні властивості $m(\alpha_0)$ стає більш помітним, вимоги до кута при основі призми більш критичні, і оптимальний кут при основі призми при вимірюванні концентрації цукрів у всьому діапазоні $C = 0 - 80\% \in$ точно $\alpha_0 = 40^\circ$.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бусурин В.И. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
2. Виглеб Г. Датчики: пер. с нем. Мир, 1989. 196 с.
3. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. Аш Ж. и соавторы. Датчики измерительных систем: 2-х книгах. Кн.1, пер. с франц. М.:Мир, 1992. 480 с.
5. Ляликов Ю.С. Физико-химические методы анализа: Химия, 1973. 536 с.
6. Гуревич М.М. Введение в фотометрию: Л.: Энергия, 1968. 244 с.
7. Гершун А.А., Избранные труды по фотометрии и светотехнике. Л.: Гостехиздат, 1958. 548 с.
8. Булатов М.И., Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. 5-е изд., перераб.Л.: Химия , 1986. 432 с.
9. Берштейн И. Я. Спектрофотометрический анализ в органической химии. Л.: Химия, 1986. 300 с.
10. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. 2-е изд., перераб. и доп. Л: Химия, 1974. 400 с.
11. Алексеев В.Н. Количественный анализ. 4-е изд., перераб. / под ред. П.К. Агасяна. М.: Химия, 1972. 504 с.
12. ГОСТ Р 8.749-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик. Введ. 2013-05-01. М.: Стандартинформ, 2014. 27 с.
13. Ландсберг Г. С. М. : Наука, 1976. 928 с.
14. Shubert E. F. Light-emitting diodes second edition. Cambridge : Rensselaer Polytechnic Institute, 2006. 436 p.
15. L-34 F3C DATA SHEET URL: [www/ URL: http://rapidonline.com/](http://www.rapidonline.com/) (дата звернення 15.10.2022).
16. Arduino.ru: Аппаратная платформа Arduino: [www/ URL: http://arduino.ru/](http://arduino.ru/) (дата звернення 25.10.2022).

17. Борн М. Основы оптики М.: Наука, 1970. 820 с.
18. Мальцев А. Молекулярная спектроскопия М.: МГУ, 1980. 237 с.
19. Никитина Н.Г. Методы исследования состава материалов электронной техники М.: МИЭТ, 1994. 568 с.
20. Берг А. Светодиоды: пер. с англ. М.: Мир, 1979. 686 с.
21. Ярив А. Введение в оптическую электронику: пер. с англ. М.: Высш. шк., 1983. 398 с.
22. К.И. Блох Светопроводы для передачи изображения. Сборник.М.: ЦИНТИлегпром, 1961. 75 с.
23. Краткий физико-технический справочник. Под общей редакцией К.П. Яковлева, Том 1. Математика. Физика. Гос. Изд. Физ-мат. лит. Москва, 1960.
24. Кухтін С. М. Сучасний розвиток волоконно-оптичних сенсорів в медицині: науково-практична конференція з міжнародною участю «Медико-психологічні аспекти реабілітації і абілітації в епоху турбулентності». Україна. Донецька область, м. Костянтинівка. С. 4–6.