

ДВНЗ «УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Інженерно-технічний факультет


Кафедра приладобудування

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

кандидат фізико-математичних наук:

Чичура Ігор Іванович


«25» червня 2024р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

на тему «Первинний вимірювальний перетворювач волоконно-оптичного сенсора температури»


ГОВАЛЛЮ Крістіна Олександрівна

(прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

Керівник: доц. ТУРЯНИЦЯ І.І.

(вчене звання, ПІБ, посада)


(підпис)

Ужгородський національний університет

Інженерно-технічний факультет

Кафедра приладобудування

Освітньо-кваліфікаційний рівень «БАКАЛАВР»

Напрямок підготовки 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри

ст.викл. Чичура Ігор Іванович


«24» травня 2024р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ**

Студентки: Говалло Крістіни Олександрівної

(прізвище, ім'я, по-батькові).

1. Тема КБР: Первинний вимірювальний перетворювач волоконно-оптичного сенсора температури.

Керівник роботи: Туряниця Іван Іванович доц.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені розпорядженням по ІТФ від «__» _____ 2024 року №__.

2. Строк подання студентом роботи: «__» _____ 2024 року №__.

3. Консультант

4. Термін здачі студентом закінченого проекту: «20» червня 2024 року.

5. Вихідні дані до роботи:

- Призначення об'єкту проектування. Контроль температури на значній відстані від блоку реєстрації.
- Передавальна характеристика волоконно-оптичного датчика.
- Аналоговий (або цифровий) вихід з електронної схеми.
-
- Регламентовані розміри друкованої плати: не регламентується.
- Спеціальні вимоги: використати Y-відгалужувач.

6. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

- Вступ;
- Огляд і аналіз аналогів об'єкту проектування;
- Базові розрахунки по принциповій електричній схемі (по вибору керівника);

- Висновки;
 - Перелік посилань.
7. Перелік графічного матеріалу (формат кожного креслення не має перевищувати А2 по ГОСТ 2.301-68)
- Структурна або функціональна електрична схема – формат А2
 - Принципова електрична схема – формат А2
 - Складальне креслення друкованого вузла – формат А2
 - Передавальна характеристика ПВП
8. Дата видачі завдання: «15» січня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання КБР	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд літератури і аналогів	15.01.2024	
2	Розділ по поширенню світлового промення в оптичному волокні	10.02.2024	
3	Розділ структурної схеми	12.03.2024	
4	Принципова електрична схема	09.04.2024	
5	Оформлення роботи	20.05.2024	


Студент


(Підпис)

Керівник КБР






(Підпис)


Ім'я ПРІЗВИЩЕ


Ім'я ПРІЗВИЩЕ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	(5)
1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ АМПЛІТУДНОЇ МОДУЛЯЦІЇ.....	(7)
2. ДАТЧИКИ НА ОСНОВІ МОДУЛЯЦІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС ПРОХОДЖЕННЯ ЧЕРЕЗ СЕРЕДОВИЩЕ ЗІ ЗМІННИМ ПРОПУСКАННЯМ.....	(9)
3. ДАТЧИКИ ВІДБИВНО-ПРОПУСКНОГО ТИПУ.....	(12)
4. ДАТЧИКИ НА ОСНОВІ ПОРУШЕННЯ ПОВНОГО ВНУТРІШНЬОГО ВІДОБРАЖЕННЯ.....	(13)
5. ПРИНЦИП ДІЇ ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДІВ.....	(17)
6. ОСНОВИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ОПТИКИ.....	(22)
7. АНАЛІЗ ПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ СВІТЛА У ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ.....	(25)
8. ПАРАМЕТРИ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН.....	(31)
8.1 Геометричні та оптичні параметри оптичних волокон.....	(31)
8.2 Параметри оптичних волокон.....	(35)
9. ПРОЕКТНО-РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ.....	(44)
9.1 Термочутливий елемент.....	(45)
9.2 Технічні характеристики джерела випромінювання.....	(45)
9.3 Технічні характеристики оптичного волокна.....	(47)
9.4 Розрахунок світлової енергії, що попадає на площадку приймача випромінювання ВОДТ.....	(48)
9.5 Розрахунок струму фотодіода.....	(49)
10. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМ.....	(53)
ВИСНОВКИ.....	(59)
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	(60)
ДОДАТКИ.....	(62)

					КБР				
	Прізвище ім'я	Підпис	Дата			Літера	Аркуш	Аркушів	
Розробив	Говалло К.О.			Первинний вимірювальний перетворювач волоконно-оптичного сенсора температури				62	
Перевірив	Гуряниця І.І.								
Н/контроль									
Затвердив									
						УжНУ, ІТФ, АКІТ - 4 курс			

Вступ

Сучасну промисловість важко уявити без автоматизованих систем управління. Складні конструкції та механізми вимагають постійного контролю різних параметрів процесів, що відбуваються в них. Моніторинг стану складних інженерних споруд і промислових систем є невід'ємною частиною їх повсякденної експлуатації. Для здійснення такого моніторингу необхідні датчики і системи для контролю різних фізичних величин, таких як температура, механічні деформації і тиск.

На разі на ринку вимірювальних систем і датчиків продовжує домінувати електронна вимірювальна техніка, яка перетворює параметри вимірювання в електричні сигнали та обробляє їх. В якості альтернативи цьому підходу використовуються волоконно-оптичні вимірювальні системи, в яких параметри вимірювання перетворюються в оптичні сигнали, що передаються по оптичному волокну. Ринок волоконно-оптичних датчиків неухильно зростає і незважаючи на очевидні переваги перед електронними технологіями (вибухозахищеність, стійкість до електромагнітних завад, висока роздільна здатність), відносна частка волоконно-оптичних датчиків на загальному ринку вимірювальних систем все ще невелика. Насправді, волоконно-оптичні датчики використовуються тільки в нішевих додатках, де звичайні вимірювальні прилади або недоступні, або занадто дорогі. Варто відзначити дві тенденції в реальному часі. По-перше, швидкий розвиток волоконно-оптичної передачі інформації, отримання і обробки зображень за допомогою цифрового фото і відео обладнання, а також супутніх технологій, таких як мікропроцесорна техніка, сприяли розвитку волоконно-оптичних вимірювальних приладів і зниженню вартості технології виробництва. По-друге, промисловість і регуляторні органи висувають дедалі жорсткіші вимоги до умов праці саме, такі вимоги, як захищеність, безпека вимірювань і точність, є тими критеріями, яким відповідають волоконно-оптичні датчики. Таким чином, ці 2 тенденції можуть призвести до ситуації, коли

									Арк.
									5
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР 20050026ПЗ				

1 ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ АМПЛІТУДНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

Амплітудна модуляція випромінювання (безпосередня модуляція інтенсивності) найбільш зручна для подальшої обробки вихідного сигналу оптичного датчика. Більшість схем амплітудної модуляції не потребує використання когерентного випромінювання, але слід зазначити, що деякі з них реалізуються лише при роботі з поляризованим випромінюванням. Схеми амплітудної модуляції не пред'являють практично ніяких спеціальних вимог ні до джерела, ні до приймача випромінювання і не потребують додаткової схеми, що обробляє вихідний сигнал датчика, так як амплітудно-модульований сигнал безпосередньо реєструється за допомогою звичайного фотоприймача.

<i>Амплітудні датчики</i>				
<u>Зі змінним поглинанням</u>	<u>Відбивно-пропускну типу</u>	<u>З порушенням ПВО</u>	<u>На основі управління випромінювання у хвильоводах</u>	<u>Світло-генераційні</u>
	<i>Зі шторками</i>	<i>Зі змінним π</i>	<i>Порушення синхронізму мод</i>	<i>Термо-генераційні</i>
	<i>Зі зустрічними ґратами</i>	<i>Оптичне тунелювання</i>	<i>Перетворення мод</i>	
	<i>З відносним переміщенням джерел та приймачів випромінювання</i>	<i>Зі змінною площею оптичного контакту</i>	<i>Керований зв'язок хвильоводів</i>	<i>Індукованого розсіювання</i>
		<i>Зі змінною геометрією світловода</i>	<i>Порушення ПВО у хвильоводах</i>	

Рисунок 1.1 класифікація ВОД

Як зазначено на рисунку 1.1, амплітудна модуляція оптичного сигналу може бути здійснена за рахунок:

- 1) безпосереднього ослаблення світла в середовищі при зміні коефіцієнта поглинання κ ;
- 2) Зміни поперечного перерізу оптичного каналу;
- 3) Зміни поглинальної (відбивної) здатності при варіації показника заломлення n , в тому числі порушення повного внутрішнього відображення (ППО);
- 4) Керованого зв'язку хвилеводів при зміні n ;
- 5) Отримання додаткового випромінювання при впливі вимірюваного фізичного фактора.

									Арк.
									8
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ				

2 ДАТЧИКИ НА ОСНОВІ МОДУЛЯЦІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС ПРОХОДЖЕННЯ ЧЕРЕЗ СЕРЕДОВИЩЕ ЗІ ЗМІННИМ ПРОПУСКАННЯМ

Згідно із законом Бугера - Ламберта випромінювання, що пройшло шлях l в деякому середовищі з коефіцієнтом поглинання κ , послаблюється в $\exp(\kappa l)$ разів. Тому управління випромінюванням в оптичному каналі, що зв'язує джерело та приймач випромінювання, може здійснюватися за рахунок безпосереднього впливу на коефіцієнт κ поглинання речовини. Реєстрація змін поглинальної здатності речовини використовується, наприклад, для аналізу складу газових потоків. Спеціальна кювета забезпечує велику довжину шляху оптичного випромінювання в газовому середовищі, що дозволяє виявити досить слабкі лінії поглинання та по них ідентифікувати газову суміш [1]. Для вимірювання коефіцієнта поглинання κ може використовуватися лазер, випромінювання який вводиться за допомогою волоконних світловодів в багатопрохідну кювету, розташовану у віддаленій точці вимірювання (рисунок 2.1). Абсорбційний метод заснований на строгій залежності довжини хвилі поглинання від складу газової суміші. Використовуючи лазер з довжиною хвилі, що перебудовується, можна вимірювати спектральну залежність абсорбції газової суміші.

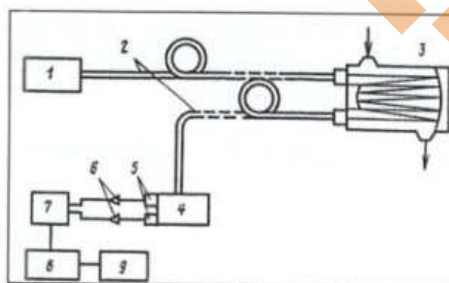


Рисунок 2.1. Амплітудний датчик на основі змінного коефіцієнта поглинання середовища: 1 – лазер, що перебудовується; 2 – волоконні світловоди; 3 – багатопрохідна кювета; 4 – спектральний фільтр; 5 – фотодетектори; 6 – підсилювачі; 7 – дільник; 8 – обчислювач; 9 – дисплей.

Волоконні світловоди застосовуються також для детектування радіаційного випромінювання, яке спричиняє додаткові втрати у світловодах усіх типів. Коефіцієнт поглинання пропорційний довжині ділянки, що опромінюється, і для більшості світловодів - дозі радіації аж до 20 Гр [2]. Світловоди з плавеного кварцу з полімерним покриттям мають нелінійну залежність втрат при перевищенні дози на кілька грей. Індуковані опроміненням втрати у світловоді суттєво змінюються з довжиною хвилі (рис. 2.2) і частково або повністю зникають з часом (рис. 2.3). Розміри втрат і швидкість їхнього зменшення сильно залежать від матеріалу. У випадку справедливо, що світловоди з початковими малими втратами пропускання мають і низькі індуковані радіацією втрати.

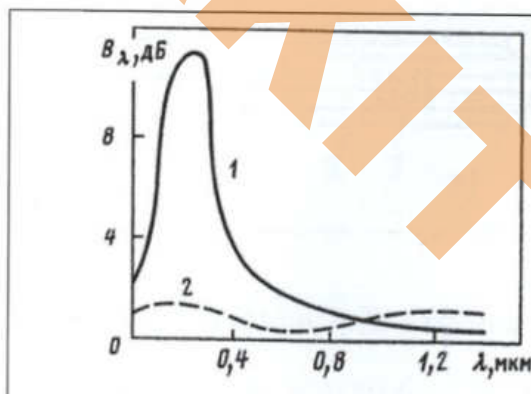


Рисунок 2.2. Спектральні втрати у світловоді завдовжки 30 м після γ -опромінення дозою 4 Гр: 1- світловод з плавеного кварцу з полімерним покриттям; 2 — кварцовий світловод з підвищеним вмістом води в серцевині.

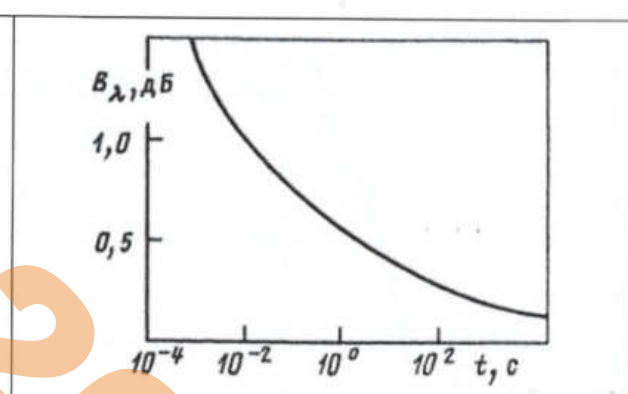


Рисунок 2.3. Тимчасова залежність втрат у світловоді, індукованих імпульсним γ -опроміненням (тривалість імпульсу 1 мкс, доза 4 Гр, довжина світловода 30 м)

Для створення амплітудних датчиків напруженості електричного поля та температури зі змінним поглинанням можна використовувати напівпровідникові матеріали, що розташовуються між випромінюючим та

приймальним торцями волоконних світловодів. Зміна поглинання оптичного випромінювання напівпровідником відбувається в результаті зсуву краю смуги поглинання матеріалу при впливі на нього електромагнітних полів або температури. До матеріалу напівпровідника представляється вимога великої крутості кута поглинання матеріалу. Найбільше цей ефект проявляється в арсеніді галію. Так використання напівпровідникової прошарку з GaAs або CdTe між торцями світловодів, якими поширювалося випромінювання з довжиною хвилі $\lambda=880\pm 150$ нм, дозволило створити датчик температури для діапазону $-10\div +300^\circ\text{C}$ при точності близько $\pm 1^\circ\text{C}$ з часом відгуку 2 с (рисунк 2.4) [3]. Перевагою таких датчиків є малі габарити.

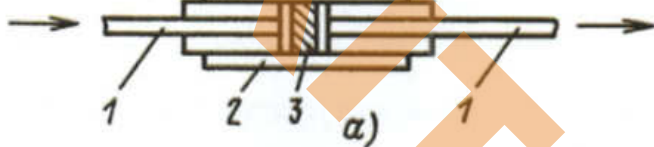
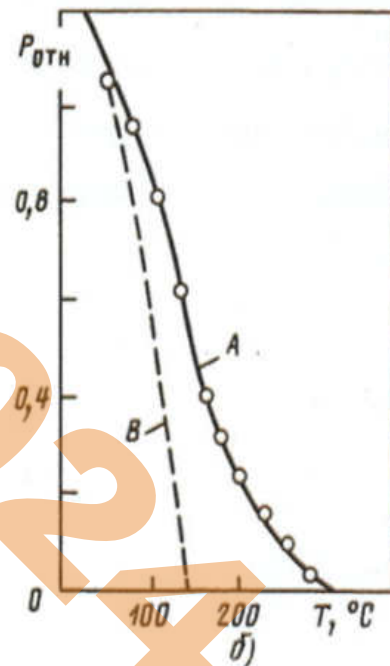


Рисунок 2.4. Пристрій датчика температури з напівпровідниковою поглинаючою пластиною з GaAs (а) та його функція перетворення (б):

1 – волоконні світловоди; 2-корпус; 3 - напів-провідниковий поглинач; А - експериментальна крива; В - розрахункова крива.



3 ДАТЧИКИ ВІДБИВНО-ПРОПУСКНОГО ТИПУ

Зміна оптичного пропускання каналу між джерелом і приймачем випромінювання досягається не тільки за рахунок зміни властивостей однорідного матеріалу, що утворює оптичний канал, але і при введенні в нього сторонніх елементів (шторок, діафрагм, ґрат), що зменшують поперечний переріз каналу, а отже його пропускання. Найпростішим датчиком такого типу є оптичний датчик тиску p , в якому між джерелом випромінювання (світлодіодом) і двома фотоприймачами при варіаціях тиску переміщається шторка, що перекриває потік випромінювання, що падає на один із фотоприймачів (рисунок 3.1) [4]. Для перекриття потоку, що падає на вимірювальний фотоприймач, достатньо переміщення шторки в буквально міліметра. Для виключення залежності від яскравості світлодіода зазвичай використовують контрольний фотодіод, сигнал якого порівнюється з вихідним сигналом вимірювального фотодіода. Отримувана нелінійність функції перетворення $I_{\text{фп}} = f(p)$ становить приблизно 0,6%, а стабільність - близько 0,2%.

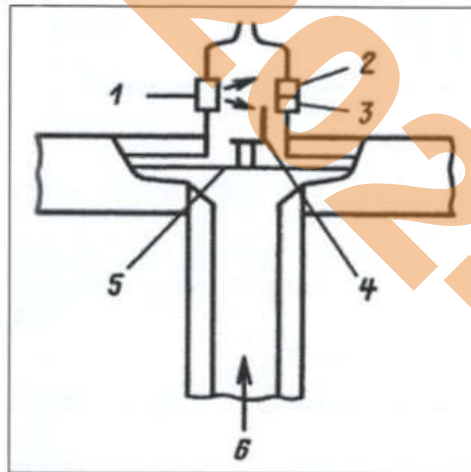


Рисунок 3.1. Датчик тиску зі шторкою: 1 – світлодіод; 2, 3 - контрольний та вимірювальний фотодіоди; 4 - шторка; 5-мембрана; 6-хвиля тиску.

4 ДАТЧИКИ НА ОСНОВІ ПОРУШЕННЯ ПОВНОГО ВНУТРІШНЬОГО ВІДОБРАЖЕННЯ

Принцип дії цих датчиків ґрунтується на зменшенні світлової енергії, що передається по оптичному каналу у вигляді направлених мод, при порушенні повного внутрішнього відображення (ПВО) випромінювання від меж протяжного світловода. Умова ПВО випромінювання, що визначається нерівністю $\theta > \arcsin(n_2/n_1)$, де θ — кут поширення випромінювання у світловоді; n_1, n_2 — показники заломлення світловода та зовнішнього середовища (рисунок 4.1), легко порушити при зміні n_1 або n_2 , зміні перемінного зазору d між світловодом і зовнішнім середовищем (розділених наприклад повітряним проміжком) або змінної площі оптичного контакту S зовнішнього середовища со світловодом [5], а також при зміні геометрії оптичного каналу.

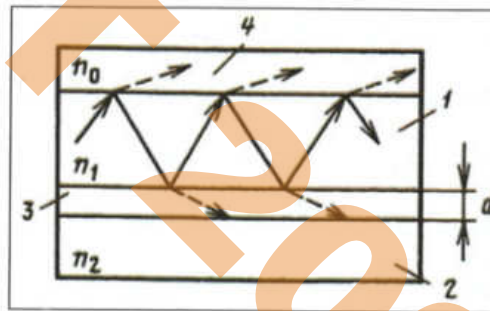


Рисунок 4.1. До пояснення принципу дії датчика з порушенням повного внутрішнього відображення: 1- хвильоводний канал; 2 - зовнішнє середовище; 3 – проміжок; 4 – підкладка.

Зміни показника заломлення світловода або зовнішнього середовища (останнє найчастіше зручніше) під дією зовнішнього обурення можна досягти як при використанні матеріалів зі змінним показником заломлення (електрооптичних, магнітооптичних, фотопружних і т. д.), так і при механічному переміщенні зовнішнього середовища (заміні одного середовища на інше). Застосування матеріалів із змінним показником заломлення дозволяє створювати модулятори оптичного випромінювання, перемикачі, дефлектори. Для керування світловим променем часто використовуються рідкі кристали,

які внаслідок великого електрооптичного ефекту ненастільки чутливі до напрямку поширення випромінювання і допускають роботу зі слабо колімованими світловими потоками.

Фотопружні властивості деяких матеріалів дозволяють створювати датчики тиску та зусилля з порушенням ПВО. Так, якщо використовувати волоконні світловоди з полімерним покриттям, флуктуації тиску, що впливає на світловод, призведуть до амплітудної модуляції вихідного оптичного сигналу. Це пов'язано з тим, що зміна показника заломлення полімерної оболонки збільшується при додатку тиску значно сильніше, ніж у скляної серцевини. В результаті зростає критичний кут на межі серцевини - оболонка, що призводить до виходу частини світлової енергії з серцевини в оболонку (Рисунок 4.2) [6].

Заміна одного зовнішнього середовища, що контактує з хвильоводом, на інше (з відмінним від першої показником заломлення) також призводить до зміни умов відображення променів на границі. Показники заломлення зовнішніх середовищ можуть істотно відрізнитись один від одного ($\Delta n > 0,1$), що дозволяє створювати датчики з порушенням ПВО, що працюють на одному/двох відображеннях та виконувати у вигляді призми (Рисунок 4.3). Такі датчики можуть бути використані в індикаторах рівня та виду рідини, безконтактних перемикачах, що реагують на дотик (тактильних датчиках) [7].

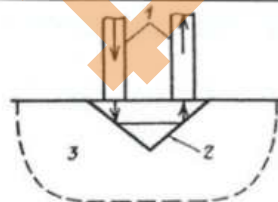
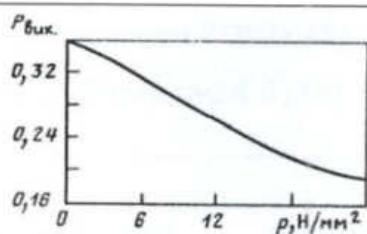


Рисунок 4.2. Залежність потужності випромінювання на виході скляного волоконного світловоду з полімерним покриттям від зовнішнього тиску

Рисунок 4.3. Призмений датчик з двома відображеннями: 1 – волоконні світловоди; 2 – призма; 3 – зовнішнє контрольоване середовище

Якщо необхідно реєструвати зовнішній вплив, що призводить до незначної зміни показника заломлення зовнішнього середовища, то, як і у випадку електро та магнітооптичних матеріалів, потрібно збільшувати протяжність області взаємодії випромінювання з навколишнім середовищем, що перебудовується.

Для реєстрації змін показника заломлення зовнішнього середовища використовуються також ВС з крутими вигинами, на яких моди світловода, що направляються, перетворюються на оболонкові та випромінювальні, що призводить до зменшення сигналу на виході світловода.

Відомо, що світлопропускання прямолінійних ділянок ВС практично незмінне в області позитивних температур T і зменшується (особливо сильно для кварц-полімерних волокон) при негативних температурах. Однак для вигнутих ділянок кварц-полімерних світловодів залежність світлопропускання від температури явно виражена і в ділянці $T > 0^\circ\text{C}$. вигнутої ділянки та збільшення світлопропускання всього світловода. Температурна залежність світлопропускання волоконних світловодів може бути покладена в основу роботи ряду амплітудних датчиків температури, що діють як при негативних, так і при позитивних температурах.

Як правило, застосовуються вигини з радіусом $R_{\text{виг}}$, меншим за деякий критичний $R_{\text{кр}}$, при якому все випромінювання залишає серцевину ВС і виходить в оболонку (Рисунок 4.4) [8].

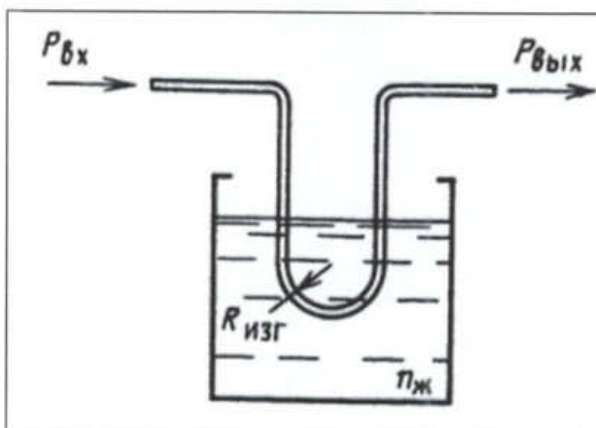


Рисунок 4.4. Волоконний датчик рівня або типу рідини, що використовує крутий вигин світловоду

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

15

Нехай у ВС, що має вигин з радіусом $R_{виг} \leq R_{кр}$, вводиться випромінювання зі спектральним розподілом потужності $P_{вх}(\lambda)$. На ділянці з вигином після виходу випромінювання в оболонку воно падає на межу розділу оболонка – зовнішнє середовище в деякому діапазоні кутів падіння $\theta_1 \leq \theta_i \leq \theta_2$. Граничні кути падіння θ_1 та θ_2 визначаються з використанням показника заломлення зовнішнього середовища $n_1 = n_{i1}$, при якому починається ослаблення сигналу на виході ВС, та показника $n_1 = n_{i2}$, при якому сигнал на виході ВС обертається в нуль:

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

де n_2 - показник заломлення оболонки ВС. Якщо вся потужність розподіляється по кутах падіння θ_i ; у цьому діапазоні відповідно до деякої функції розподілу $f(\theta_i)$, то, не враховуючи втрати в матеріалі ВС, для $n_1 < n_2$ маємо:

$$\frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta_i) d\theta_i = 1 \quad (4.1)$$

Якщо вигнутий ВС занурений у зовнішнє середовище, то спектр потужності випромінювання на його виході визначиться як:

$$P_{вих(\lambda)} = \frac{P_{вх(\lambda)}}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta_i) R(\theta_i, \lambda) d\theta_i \quad (4.2)$$

де $R(\theta_i, \lambda)$ - відбивна здатність межі розділу оболонка - зовнішнє середовище, що визначається формулами Френеля.

5 ПРИНЦИП ДІЇ ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДІВ

Основним елементом волоконно-оптичного кабелю (ВОК) або надалі оптичного кабелю (ОК) є волоконний світловод (ВС). Волоконний світловод, або оптичне волокно (ОВ), це оптичний хвильовід ВОСП, призначений для спрямованої передачі оптичного випромінювання, виконаний у вигляді тонкої скляної нитки циліндричної форми з круглим поперечним перерізом. Оптичне волокно складається з серцевини, однієї або кількох оболонок та одного або кількох захисних покриттів.

Серцевина ОВ це центральна область ОВ, якою передається основна частина оптичної потужності сигналу. Середнє значення показника заломлення (ПП) оболонки менше середнього значення у серцевині. В ОВ застосовуються однорідні або депресовані оболонки. У однорідних оболонках ОВ значення ПП постійне, у депресованих оболонках змінне. Діелектричним матеріалом для серцевини та оболонки ОВ служить плавлений кварц (кварцове скло), чистий або з домішками хімічних елементів та їх сполук, невеликі пропорції яких сприяють зміні оптичних властивостей плавленого кварцу належним чином. Плавлений кварц це аморфна, прозора речовина з хімічною формулою двоокису кремнію SiO_2 . Серцевина та оболонка ОВ мають різні оптичні характеристиками (показниками заломлення n_1 і n_2). Якщо серцевина служить для передачі електромагнітної енергії, то оболонка для створення кращих умов відображення на межі розділу *серцевина оболонка*, захисту серцевини волокна від механічних пошкоджень, а також для захисту від випромінювання енергії в навколишнє середовище та поглинання небажаного випромінювання ззовні.

Волоконні світловоди поділяються на дві групи: багатомодові та одномодові. У конструктивному відношенні вони відрізняються діаметром серцевини (Рисунок 5.1). В одномодовому світловоді діаметр серцевини d_1 , порівняний з довжиною хвилі ($d_1 \approx \lambda$), і по ньому передається лише один тип хвилі (моди). У багатомодових світловодах діаметр серцевини d_2 більший за

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

17

поширюється лише один промінь.

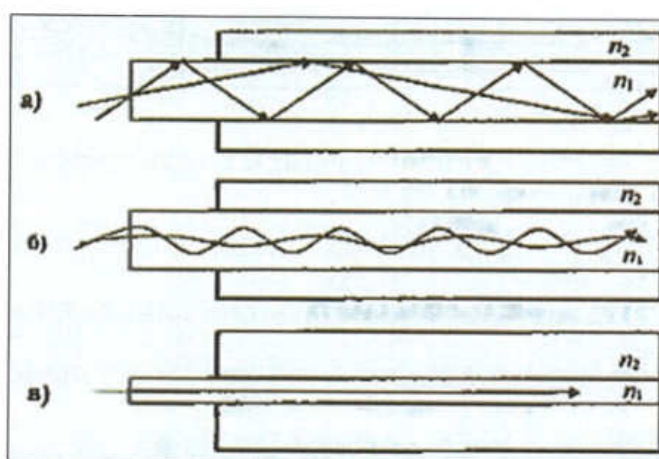


Рисунок 5.2. Волоконні світловоди: а – ступінчасті багатомодові; б – градієнтні багатомодові; в – одномодові.

Математично профіль показника заломлення (ППП) ОВ може бути описаний виразом виду:

$$n_r = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^u \right]^{1/2}, \quad (5.1)$$

де n_1 – максимальне значення ППП на осі волокна, тобто, при $r = 0$; a – радіус серцевини; u – показник ступеня, що описує зміну ППП; Δ – відносна різниця показників заломлення серцевини та оболонки ОВ. У різних волокнах значення Δ змінюється від 0,003 до 0,01.

Показник ступеня для трикутного профілю ПП дорівнює – 1, параболічного – 2, а прямокутного (ступінчастого) – ∞ .

Фізичні процеси, що відбуваються при поширенні електромагнітних хвиль у волоконних світловодах оптичних кабелів, мають свої особливості. На відміну від звичайних кабелів, що мають електричну провідність і струм провідності $I_{пр}$ ОК мають зовсім інший механізм передачі, а саме: струми зміщення $I_{см}$, на основі котрих діє також радіопередача. Однак хвиля в ОК розповсюджується не у вільному просторі, а концентрується у самому обсязі світловода і передається по ньому в заданому напрямку (Рисунок 5.3).

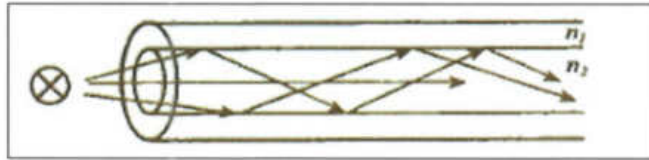


Рисунок 5.3. Процес передачі хвилі по світловоду.

Наприклад, передача хвилі світловодом зі ступінчастим профілем показника заломлення здійснюється за рахунок відображень її від межі сердечника та оболонки, що мають різні показники заломлення (n_1 і n_2).

У звичайних кабелях носієм інформації, що передається, є електричний струм, а в ОК – лазерний промінь.

У симетричних та коаксіальних кабелях передача здійснюється по двопровідній схемі із застосуванням прямого та зворотного провідника ланцюга. У світловодах, хвильоводах та деяких інших напрямних системах немає двох провідників, і передача відбувається хвильовим методом за рахунок багаторазового відображення хвилі від межі поділу серед (Рисунок 5.4). Такою межею, що відбиває, може бути *метал - діелектрик, діелектрик - діелектрик* з різними діелектричними (оптичними) властивостями та ін. На хвильоводному принципі діють світловод, хвильовід, лінія поверхневої хвилі, діелектричний хвильовід та інші конструкції напрямних систем.

Кордон розділу різних напрямних систем характеризується співвідношенням між довжиною хвилі λ і поперечними розмірами напрямної системи d . При $\lambda > d$ потрібні два дроти: прямий і зворотний і передача відбувається за звичайною двопровідною схемою. При $\lambda < d$ не потрібно двопровідної схеми і передача відбувається за рахунок багаторазового зигзагоподібного відображення хвилі від меж розділу середовищ з різними характеристиками. Тому передача по хвильоводним системам (світловодам, хвильоводам та іншим НС) можлива лише за частот, у яких довжина хвилі порівнянна або менша, ніж поперечні розміри діаметр НС.

6 ОСНОВИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ОПТИКИ

Геометрична оптика має історію, датовану двома тисячами років, і припускає, що світло складається з променів, що поширюються від джерела по прямих лініях у гомогенному середовищі, наприклад склі, воді, повітрі або вакуумі. При цьому в геометричній оптиці прийнято твердження, що плоскі хвильові фронти поширюються під прямими кутами до кожного променя і світло зменшується пропорційно квадрату відстані.

Загалом під швидкістю світла розуміють швидкість електромагнітної енергії у вакуумі. В інших матеріалах (наприклад, у склі) світло поширюється з меншою швидкістю. При переміщенні з одного матеріалу до іншого змінюється швидкість поширення, що, з погляду хвильової теорії, призводить до зміни напрямку руху. Відхилення світла від прямого напрямку називається заломленням. Хвилі з різними довжинами в тому самому матеріалі поширюються з різними швидкостями. Залежність швидкості від довжини хвилі має важливе значення у волоконній оптиці.

Як відомо, промінь світла при падінні на межу розділу двох середовищ ділиться на відбитий і заломлений. Відповідно до закону відображення промінь світла, що падає на межу розділу двох середовищ, відбивається під тим самим кутом ($\varphi_{отр.}$) до нормалі (перпендикуляру до границі), як і кут падіння (φ_n) до поверхні, тобто. $\varphi_n = \varphi_{отр.}$.

Відповідно до закону Снелліуса (закон заломлення) промені світла, що падають на межу розділу двох середовищ, мають кути заломлення, відмінні від кутів падіння до нормалі межі цих серед. Зв'язок цих кутів визначається виразом:

$$n_1 \sin \varphi_{1n} = n_2 \sin \varphi_{1np}, \quad (6.1)$$

де n_1 і n_2 - показники заломлення першої та другої середовищ відповідно.

Показники заломлення n (величина безрозмірна) виражаються через відношення швидкості світла у вакуумі (c) до швидкості світла у матеріалі (v):

									Арк.
									22
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ				

$$n = \frac{c}{v} \quad (6.2)$$

Показники заломлення різних речовин та швидкості поширення світла в них наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Показники заломлення різних матеріалів:

Матеріал	Показник заломлення	Швидкість світла, км/с
Вакум	1.0	300 000
Повітря	1.0003(1)	300 000
Вода	1.33	225 000
Кварц	1.46	205 000
Скло	1.5	200 000
Алмаз	2.5	120 000

Особливий інтерес для волоконної оптики є тим, що показник заломлення скла може змінюватися в залежності від його складу. Кількість відбитого світла границі двох сред залежить від своїх показників заломлення. Якщо випромінювання видимої області спектру падає на межу розділу двох середовищ і переходить з оптично більш щільного середовища n_1 , на оптично менш щільне n_2 ($n_2 < n_1$) і кут падіння збільшується, то кут заломлення наближається до 90° . Збільшуючи кут падіння, можна досягти такого стану, при якому заломлений промінь розташовуватиметься вздовж межі поділу середовищ, не переходячи в інше середовище. Кут падіння у своїй називається критичним кутом ($\varphi_{кр}$) повного внутрішнього відбиття, тобто. кут падіння, при якому кут заломлення дорівнює 90° , називається критичним кутом. Якщо кут падіння більший за критичний, то світло повністю відображається у вихідне середовище, не проникаючи в інший матеріал. У цьому має місце лише відбиток, а заломлення відсутнє, що зумовлює повному внутрішньому відбитку, тобто. при $\varphi_{пад} = 90^\circ$

7 АНАЛІЗ ПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ СВІТЛА У ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ

У геометричній оптиці світлові хвилі зображуються променями, спрямованими нормалі до хвильової поверхні. При падінні світлової хвилі на пласку межу розділу двох діелектриків з різними значеннями відносної діелектричної проникності (ϵ) у загальному випадку спостерігаються минула (заломлена) та відбита хвилі. Відповідно до закону Снелліуса кут падіння пов'язаний з кутами відображення та заломлення за допомогою рівності $\varphi_n = \varphi_{отр}$ та виразу (6.1). Оскільки в оптичних середовищах відношення магнітної проникності (μ) до магнітної проникності вакууму (μ_0) приймається рівним одиниці, то в цьому виразі $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$, а $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$. В ОВ середовище серцевини більш щільне, ніж середовище оболонки, тобто $n_1 > n_2$, тому за вугілля падіння $\varphi_n > \varphi_{кр}$ світло повністю відбивається від межі серцевина оболонка і розповсюджується тільки в серцевині волокна. Як відомо, критичний кут падіння світла визначається виразом:

$$\varphi_{кр} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (7.1)$$

Потік енергії з першого середовища в друге в середньому дорівнює нулю, і енергія електромагнітної хвилі, що падає, повністю повертається в перше середовище.

Як приклад розглянемо ОВ зі ступінчастим профілем показника заломлення. Ступінчасте оптичне волокно (Рисунок 7.1) є двошаровою скляною ниткою, серцевина якої виготовлена зі скла з показником заломлення n_1 , діаметром $2a = (3 \dots 50)$ мкм, а оболонка має показник заломлення n_2 і діаметр $2b = 125$ мкм. Для забезпечення повного внутрішнього відображення на межі розділу необхідно, щоб $n_1 > n_2$. Поверх оболонки накладається захисне покриття з показником заломлення $n_3 < n_2$.

На рисунку 7.1 світлові промені, що описують однорідні плоскі хвилі,

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

25

пучком походять від точкового джерела, розташованого на осі волокна. На торці ОВ цей пучок променів перетворюється на два типи променів волокна: меридіональні, які перетинають вісь волокна, і косі, які не перетинають цю вісь. На рисунку 7.2 представлена траєкторія проходження косого променя в ступінчастому ОВ. Частина меридіональних і косих променів, відчуваючи повне внутрішнє відображення в місцях падіння на межу *серцевина оболонка*, поширюється зигзагоподібно вздовж ОВ.

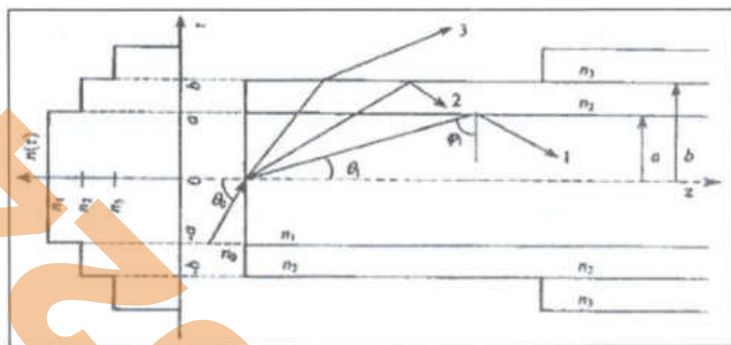


Рисунок 7.1. Модель ОВ із ступінчастим профілем показника заломлення.

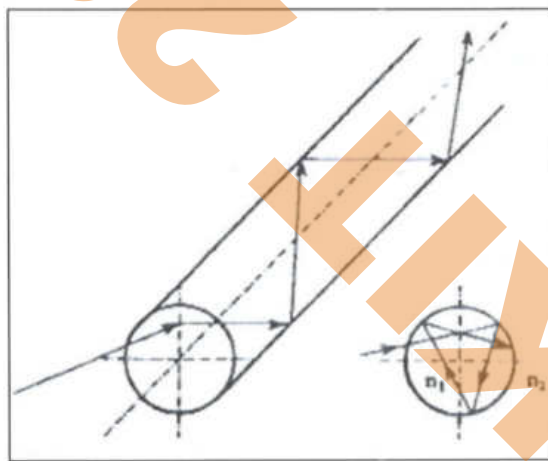


Рисунок 7.2. Траєкторія проходження косого променя в ОВ.

Розглянемо хід меридіональних променів, що падають на вхідний торець ОВ і потім розповсюджуються вздовж волокна (рисунок 7.1). Залежно від кута нахилу променя θ_1 до осі Z меридіональні промені, що лежать у площині малюнка, можуть відчувати повне внутрішнє відображення на межі *сердечник*

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

26

- оболонка, якщо $\theta_1 < \arccos(n_2/n_1)$. При цьому утворюються моди сердечника 1, або моди, що направляються. Якщо промінь падає під кутом $\arccos(n_2/n_1) < \theta_1 < \arccos(n_3/n_2)$, то він може сформувати моду оболонки 2. Світлові промені, що падають під кутом $\theta_1 > \arccos(n_3/n_2)$, випромінюються у відкритий простір, тобто у захисну оболонку, утворюючи витікаючі моди, або моди випромінювання 3.

Промінь, що падає на торець волокна з навколишнього середовища під кутом θ_0 до осі волокна, переломлюється при входженні в сердцевину і розповсюджується в ній під кутом θ_1 відповідно до закону Снелліуса:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1}. \quad (7.2)$$

При цьому заломлений промінь падає на бічну поверхню під кутом $\varphi_1 = (\pi/2) - \theta_1$. Для повного внутрішнього відбиття променів від бічної поверхні необхідно, щоб $\varphi_1 \geq \varphi_{кр}$, де критичний кут падіння - $\varphi_{кр}$ визначається виразом - (7.1). Отже, $\sin \varphi_1 = \cos \theta_1 \geq n_2/n_1$. Із цього (7.2) випливає, що

$$\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

Таким чином:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0} \geq \frac{n_2}{n_1} \text{ або } \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 - \left(\frac{n_0}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_0 \geq 1.$$

Однак $\sin^2 \theta_0 \leq 1$, тобто:

$$\frac{n_1}{n_2} \geq 1 + \frac{n_0}{n_2} \sin^2 \theta_0 \quad (7.3)$$

Таким чином, якщо виконується умова (7.3), будь-який меридіональний промінь поширюється вздовж сердцевини волокна. Ця умова є справедливою і для косих променів. На рисунку 7.3 представлена конструкція волокна в оболонці із захисним покриттям, в якому оптичне випромінювання поширюється в ОВ такої конструкції при виконанні умови $n_1 > n_2 > n_3$. Співвідношення між n_1 і n_2 прийнято характеризувати відносною різницею ПП

									Арк.
									27
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ				

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad (7.4)$$

яка для більшості ОВ становить $10^{-2} \dots 10^{-3}$. Показник заломлення оболонки має постійне значення, а серцевини або постійне, або змінюється по радіусу за певним законом.

Зміна показника заломлення ОВ вздовж радіусу називається профілем показника заломлення.

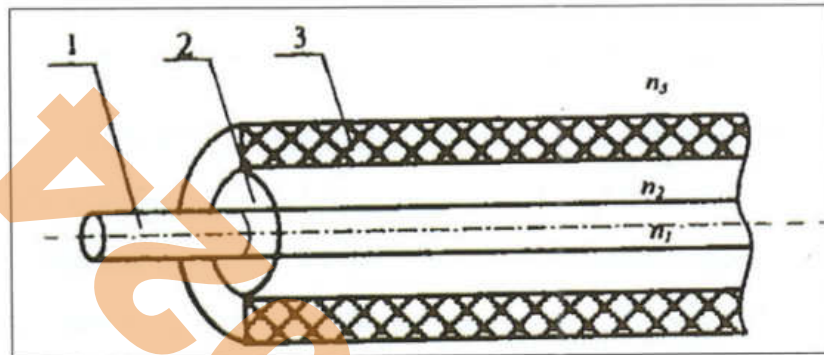


Рисунок 7.3. Оптичне волокно: 1 – серцевина; 2 – оболонка; 3 – захисне покриття.

Наявність оптичної оболонки ускладнює хвильовий процес у ОВ. Частина меридіональних і косих променів, багаторазово відбиваючись від межі серцевина - оболонка, поширюється вздовж серцевини і утворює моди серцевини (напрямки моди). Інші промені, які падають на цей кордон під кутами $\varphi_n < \varphi_{кр.}$, йдуть із серцевини назовні. Промені, що залишили серцевину, утворюють моди випромінювання. Деякі з них поширюються в оболонці за рахунок повного внутрішнього відбиття від границі оболонки довкілля та утворюють моди оболонки. Якщо захисне покриття ОВ виконане із сильно поглинаючого матеріалу, воно усуває перехресні перешкоди між ОВ в оптичному кабелі, обумовлені модами випромінювання. Крім того, захисне покриття розсіює енергію мод оболонки аналогічно спрямовується модам діелектричного стрижня. Як зазначалося вище, поле напрямних мод частково проникає в довкілля, де експоненційно зменшується, у своїй глибина проникнення в оболонку ОВ, тобто. відстань, на якому це поле зменшується в e раз ($e=2,718$),

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

28

визначається при $\varphi_n > \varphi_{кр}$. виразом:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{\sin^2 \varphi_n - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}, \quad (7.5)$$

де λ - довжина хвилі оптичного випромінювання, що вводиться в ОВ.

Режим повного внутрішнього відображення визначає умову подачі світла на вхідний торець волоконного світловоду. З рисунку 7.4 видно, що світловод пропускає лише світло, укладене в межах тілесного кута θ_A , величина якого обумовлена кутом повного внутрішнього відбиття θ_B . Цей тілесний кут характеризується апертурою. Апертура – це кут між оптичною віссю та однією з утворюючих світлового конуса, що потрапляє в торець волоконного світловоду, за якого виконується умова повного внутрішнього відображення. Зазвичай використовуються поняттям числової апертури:

$$NA = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (7.6)$$

де n_0, n_1, n_2 — показники заломлення повітря, сердечника, оболонки відповідно. Маючи на увазі, що для повітря $n_0 = 1$, отримаємо

$$NA = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (7.7)$$

Як видно із рисунку 7.4 між кутом повного внутрішнього відображення θ_B та апертурним кутом падіння променя θ_A є взаємозв'язок. Чим більший кут θ_B , тим менша апертура волокна θ_A . Для ступінчастих ОВ, що використовуються в системах зв'язку, числова апертура зазвичай дорівнює 0.18 – 0.23.

Формула (7.7) враховує лише меридіональні промені ОВ. Однак, в основному, в ОВ переважають косі промені, які не перетинають вісь, а поширюються по ламанам (для ступінчастого ОВ) або право-або ліво-винтових спіралів (для градієнтного ОВ).

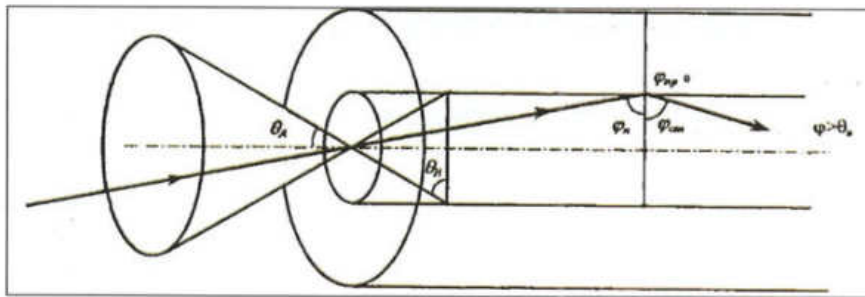


Рисунок 7.4. Принцип дії ОВ

Висновок простого вираження для числової апертури косих променів дуже складний. Зазначимо тільки, що числова апертура, підрахована для меридіональних променів ступінчастого ОВ (7.7), менше дійсної числової апертури NA_D , що враховує всі промені. Відношення NA_D/NA для різних значень ПП n_1 і n_2 , збільшується зі зменшенням різниці $n_1 - n_2$, тобто, із зменшенням апертури NA меридіональних променів.

Просте і наочне уявлення напрямних мод в ОВ за допомогою променів не враховує властивості світла як електромагнітної хвилі і в багатьох випадках не дозволяє отримати правильні результати. Наприклад, відповідно до викладеного вище вся нескінченна сукупність променів, що падають на торець ОВ у межах кута θ_A , повинна утворювати також нескінченну сукупність спрямованих мод. Однак, це не так. Хвильова теорія світла показує, що тільки кінцеве число променів кінцевого пучка з певними кутами падіння на торець може утворити напрямні моди ОВ. Це пояснюється точки зору променевої оптики в ступінчастому світловоді тим, що при повному внутрішньому відображенні від границі з оболонкою хвиля набуває фазового зсуву, що залежить від кута падіння. Якщо у серцевині багаторазово відбиті хвилі складаються по фазі, то утворюється хвиля, що направляється. В іншому випадку поля хвиль взаємно компенсуються.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

30

8 ПАРАМЕТРИ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН

8.1 Геометричні та оптичні параметри оптичних волокон

Основними геометричними параметрами ОВ є: діаметр серцевини; діаметр оболонки; діаметр захисного покриття; некруглість (еліптичність) серцевини; некруглість оболонки; неконцентричність серцевини та оболонки.

Некруглість серцевини ОВ визначається як різниця максимального і мінімального діаметрів серцевини, поділена на номінальний діаметр серцевини, і визначається тільки в багатомодових волокнах, некруглість оболонки - у багатомодових і одномодових волокнах. Некруглість серцевини ОВ (рисунок 8.1 а) визначається з виразу:

$$H_c = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{d_n}, \quad (8.1)$$

де H_c - некруглість серцевини, %; d_{\max} , d_{\min} - найбільший і найменший діаметр серцевини, мкм, відповідно; d_n - номінальний діаметр серцевини, мкм.

Некруглість оболонки ОВ визначається аналогічно.

Неконцентричність серцевини щодо оболонки визначається як відстань між центрами оболонки та серцевини ОВ (рисунок 8.1 б) та визначається з виразу:

$$H_{c/o} = \rho_o - \rho_c, \quad (8.2)$$

де $H_{c/o}$ - неконцентричність серцевини щодо оболонки, мкм; ρ_c - центр серцевини, мкм; ρ_o - координата центру оболонки, мкм.



Геометричні параметри стандартизовані до різних типів ОВ. Тому зупинімося докладніше на оптичних параметрах ОВ. Основними оптичними параметрами волокна є:

- відносна різниця показників заломлення (Δ);
- цифрова апертура (NA);
- нормована частота (v);
- число мод, що поширюються (M);
- діаметр модового поля ($d_{\text{мп}}$);
- довжина хвилі відсічення (критична довжина хвилі $\lambda_{\text{кр}}$).

Відносна різниця показників заломлення. Відносна різниця ПП серцевини та оболонки ОВ.

Числова апертура. Однією з основних характеристик, що визначають умови введення оптичних сигналів і процеси їх поширення в ОВ, є числова апертура, яка визначається для:

- оптичних волокон із ступінчастим ППП

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (8.3)$$

- оптичного волокна з градієнтним профілем ППП

$$NA = \sqrt{\frac{n_1^2(r) - n_2^2}{2}}. \quad (8.4)$$

У градієнтних ОВ використовується поняття локальної числової апертури. Її значення максимально на осі волокна і дорівнює 0 на межі розділу *серцевина - оболонка*.

Нормована частота. Цей параметр, що визначає кількість мод, дорівнює:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (8.5)$$

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

32

де λ – довжина хвилі, мкм.

Якщо $0 < v < 2,405$, то режим роботи волокна одномодовий, якщо $v > 2,405$ багатомодовий. Чим менший діаметр серцевини ОВ, тим менше мод може поширюватися по ньому і тим менше розширення отримують оптичні імпульси. Відповідно збільшується коефіцієнт широкосмуговості ОВ. Таким чином, одномодове (ООВ) може передавати більш широкосмугові сигнали, ніж багатомодове (МОВ).

Число мод у багатомодовому оптичному волокні. Загальна кількість мод у МОВ з діаметром серцевини $2a$, заданою числовою апертурою на робочій довжині хвилі λ визначається через нормовану частоту виразом виду:

$$M \approx \begin{cases} v^2/2 & \text{– для ОВ зі ступінчастим ППП,} \\ v^2/4 & \text{– для ОВ з градієнтним ППП.} \end{cases} \quad (8.6)$$

У розрахунках M може бути дробовим числом, тоді як число мод у волокні буває лише цілим і становить від однієї до тисячі мод. У волокні з градієнтним ППП і тими ж значеннями діаметра серцевини, показників заломлення n_1 і n_2 число мод приблизно в 2 рази менше, ніж в ОВ зі ступінчастим ППП. Кількість мод (з урахуванням всіх вироджених мод) у разі ступінчастого ППП визначається виразом виду:

$$M = \frac{v^2}{2(1+2/u)}, \quad (8.7)$$

де u показник ступеня, що описує зміни ППП.

Діаметр модового поля у ООВ. Важливим інтегральним параметром ООВ є діаметр модового поля. Цей параметр використовується для аналізу одномодових волокон.

У багатомодових ОВ розмір серцевини прийнято оцінювати діаметром ($2a$), в одномодових волокнах за допомогою діаметра модового поля ($d_{\text{мп}}$). Це з

тим, що енергія основної моди в ООВ поширюється у серцевині, а й частково в оболонці, захоплюючи її прикордонну область. Тому $d_{\text{мп}}$ вони більш точно оцінюють розміри поперечного розподілу енергії основної моди. Величина $d_{\text{мп}}$ є важливою при стикуванні між собою волокон, а також при стикуванні джерела випромінювання з волокном.

У [9] показано залежність розподілу інтенсивності (потужності) випромінювання основної моди одномодового волокна в ближній зоні від радіусу на рисунку 8.2. Ця залежність апроксимується з достатньою мірою точності формулою Гауса:

$$J(r) = J_0 \exp\left(-\frac{r}{W_0}\right)^2, \quad (8.8)$$

де $J(r)$ – інтенсивність випромінювання з відривом r від осі ООВ; J_0 – інтенсивність випромінювання на осі ООВ (при $r=0$); W_0 – радіус модового поля, тобто значення радіуса, при якому інтенсивність випромінювання становить $1/e^2 = 0,35J_0$.

Радіус поля моди W_0 в мікрометрах визначається при відомих значеннях v і $a=d_c/2$ із співвідношення

$$W_0 = a(0,65 + 1,619v^{-1,5} + 2,879v^{-6}) \text{ або } W_0 = a(0,65 + 1,62v^{-\frac{3}{2}}). \quad (8.9)$$

Тоді шукане значення діаметра модового поля дорівнює $d_{\text{мп}} = 2W_0$.

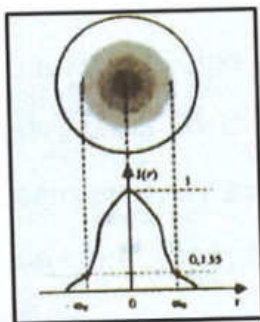


Рисунок 8.2. Залежність розподілу інтенсивності випромінювання основної моди ООВ у ближній зоні від радіусу.

Довжина хвилі відсікання в ООВ. Мінімальна довжина хвилі, при якій ОВ підтримує лише одну моду, що поширюється, називається довжиною хвилі

				Арк.	
				34	
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ

відсічення. Цей параметр притаманний ООВ. Якщо λ_p менша, ніж довжина хвилі відсікання, то має місце багатомодовий режим розповсюдження світла.

Згідно відрізняють довжину хвилі відсічки у волокні λ_c і довжину хвилі відсічення в прокладеному кабелі λ_{cc} . Перша (λ_c) відповідає слабко напруженому волокну і для ступінчастого ООВ вона визначається виразом виду:

$$\lambda_c = 2\pi a \frac{NA}{2,405}. \quad (8.10)$$

Довжина відсічення в прокладеному кабелі λ_{cc} відповідає напруженому ОВ. На практиці ОВ у прокладеному або підвішеному на опорах кабелі має велику кількість згинів. Крім того, сильні викривлення є в ОВ, покладених у касети муфт та проміжних з'єднувачах на об'єктах зв'язку (сплайс-боксах). Усе це веде до придушення побічних мод і зсуву λ_{cc} у бік коротких довжин хвиль проти λ_c . Різницю між λ_{cc} і λ_c можна оцінити лише експериментальним шляхом.

8.2 Параметри оптичних волокон

До параметрів передачі ВВ відносяться:

- коефіцієнт загасання;
- дисперсія ООВ;
- ширина смуги пропускання МОВ.

Коефіцієнт згасання оптичного сигналу. Згасання в оптичному волокні це міра ослаблення оптичної потужності, що поширюється вздовж ОВ між двома його поперечними перерізами на даній довжині хвилі. Згасання в ОВ виявляється у дБ. Коефіцієнт загасання в ОВ - це величина загасання на одиниці довжини волокна і виражається в дБ/км. Коефіцієнт загасання в ОВ обумовлюється власними втратами волокна і виражається у вигляді:

$$a = a_{pp} + a_{пм} + a_{ик} + a_{np}, \quad (8.11)$$

									Арк.
									35
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ				

де a_{pp} , a_{pm} , a_{uk} , a_{np} - складові коефіцієнта загасання за рахунок релеївського розсіювання, поглинання у матеріалі волокна, інфрачервоного поглинання та поглинання на домішках ОВ відповідно.

У загальному вигляді втрати енергії у матеріалі волокна залежать від поглинання світлової енергії, наявності сторонніх домішок, таких як гідроксильні групи (ОН), іони металів (заліза, кобальту, нікелю, міді) та інших включень, а також від втрат на поглинання потужності, що передається в інфрачервоній області сектора. Загальні втрати на поглинання ОВ визначаються формулою:

$$a_n = a_{pm} + a_{uk} + a_{np}. \quad (8.12)$$

Механізм основних втрат, що виникають при поширенні ОВ електромагнітної енергії, ілюструється рисунком 8.3. Частина потужності, що надходить на вході світловода $P_{вх}$, розсіюється через зміну напрямку розповсюджуваних променів на нерегулярностях та їх висвічуванні в навколишній простір (a_{pp}), інша частина потужності поглинається матеріалом ОВ (a_{pm}) у вигляді поляризації диполів ОВ, сторонніми домішками, що проявляється у вигляді тепла Джоулева (a_{np}). В результаті потужність на виході $P_{вих}$ зменшується. Втрати на поглинання суттєво залежать від чистоти матеріалу та за наявності сторонніх домішок можуть бути значними. Втрати на розсіювання лімітують межу мінімально допустимих втрат ОВ.

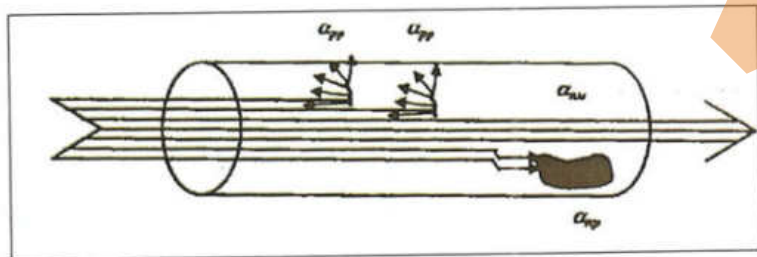


Рисунок 8.3. Механізм основних втрат у світловодах: a_{pp} - розсіювання на нерегулярностях; a_{np} - поглинання через домішок; a_{pm} - поглинання в матеріалі волокна.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

36

Розсіяння, з одного боку, обумовлене неоднорідностями матеріалу ОВ, розміри деяких менше довжини хвилі, з другого - тепловими флуктуаціями показника заломлення.

Розсіювання світла принципово неусувно і робить свій внесок у згасання ОВ навіть у тому випадку, коли втрати світла на поглинання дорівнюють нулю.

Складову коефіцієнта загасання ОВ a_{pp} (дБ/км) за рахунок Релеєвського розсіювання можна визначити з виразу:

$$a_{pp} = 4,34 \frac{8\pi^3(n_1^2-1)}{3\lambda^4} \cdot k \cdot \beta \cdot T \cdot 10^3, \quad (8.13)$$

де n_1 - ПП серцевини і дорівнює 1,48-1,50; $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К стала Больцмана; $T=1500$ К - температура затвердіння скла при витяжці; $\beta=8,1 \cdot 10^{-11}$ м²/Н - коефіцієнт стислості (для кварцу). Складову a_{pm} (дБ/км), пов'язану із втратами на діелектричну поляризацію, можна визначити з виразу:

$$a_{pm} = 8,69 \frac{\pi \cdot n_1}{\lambda} \operatorname{tg} \delta, \quad (8.14)$$

де n_1 - показник заломлення серцевини ОВ; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат серцевини ОВ.

Складову a_{uk} (дБ/км), обумовлену електронним та атомним резонансами в інфрачервоній частині спектру за рахунок коливання атомів у кристалічній решітці, можна визначити з виразу:

$$a_{uk} = C e^{-k\lambda}, \quad (8.15)$$

де C і k - постійні коефіцієнти, рівні, наприклад, для кварцу $C=0,9$, $k=(0,7 \dots 0,9) \cdot 10^{-6}$ м.

На рисунку 8.4 представлені типові залежності основних складових втрат від довжини хвилі. Як видно з графіка, релеївське розсіяння a_{pp} обмежує нижню межу втрат у лівій частині, а інфрачервоне поглинання a_{uk} - у правій

						КБР20050026ПЗ	Арк.
							37
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			

частині спектра хвиль. В даний час у техніці зв'язку в основному застосовуються кварцові ОВ, область ефективного використання яких знаходиться в діапазоні довжин хвиль до 2 мкм. При подальшому збільшенні довжини хвилі через значні величини $a_{ик}$ в ОВ кварц замінюється на інші матеріали. Зокрема, повідомляється про випробування фірмою Хьюз Ейркрафт волокон, виконаних з полікристалу бромистого та бромойодистого талію і що мають на довжинах хвиль 4 – 5 мкм коефіцієнта загасання, що дорівнює 0,01 дБ/км.

На більш довгих хвилях як якості матеріалу для волокна використовуються галоїдні, халькогенідні та фтористі скла. У порівнянні з кварцовими волокнами вони мають більшу прозорість і забезпечують зниження втрат на кілька порядків. З появою ОВ із нових матеріалів стає реальним створення ВОЛС без регенераторів. Відомі проекти будівництва підводної оптичної лінії через Атлантичний океан довжиною 6000 км без регенераторів, в яких аналізується можливість застосування ОВ з тетрафториду, ізірконію та фториду берилію [9].

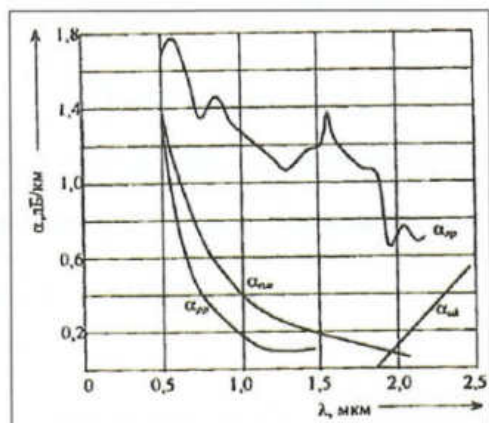


Рисунок 8.4. Складові втрат енергії.

Так як теоретичні розрахунки втрат на релеївське розсіювання і поглинання є складним завданням і точністю таких розрахунків мала, то при практичних розрахунках зручно застосовувати такі наближені формули:

$$a_{pp} \approx (6,3 \cdot 10^{11} / \lambda^4) \cdot (1 + 215\Delta), \quad (8.16)$$

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

КБР20050026ПЗ

Арк.

38

де a_{pp} - складова коефіцієнта загасання ОВ за рахунок релеєвських втрат, дБ/км;
 λ - довжина хвилі оптичного випромінювання, введеного в ОВ, нм; при
 розрахунку a_{pp} в одномодових ОВ другий доданок відкидається:

$$a_{pm} \approx 2,55 \cdot 10^{-3} \exp [4,63 \cdot 10^3 / \lambda], \quad (8.17)$$

де a_{pm} - складова за рахунок матеріальних втрат ОВ, дБ/км;

$$a_{uk} \approx 7,81 \cdot 10^{11} \exp [-4,85 \cdot 10^4 / \lambda], \quad (8.18)$$

де a_{uk} - складова α ОВ за рахунок втрат в інфрачервоній області, дБ/км.

Зі втрат на домішках у реальних ОВ, що випускаються відповідно до вимог ІТУ-TG.651, G.652, найбільш сильно проявляються втрати на гідроксильному залишку води (ОН), значення яких наступні:

$$\alpha_{он} = \begin{cases} 0,1 \text{ дБ/км} & \text{При } \lambda = 850 \text{ нм;} \\ 0,05 \text{ дБ/км} & \text{При } \lambda = 1300 \text{ нм;} \\ 0,03 \text{ дБ/км} & \text{При } \lambda = 1550 \text{ нм.} \end{cases} \quad (8.19)$$

При правильному виборі матеріалу для ОВ та робочої довжини хвилі λ сумарне оцінке значення коефіцієнта загасання ОВ, виражене релеєвськими втратами та загальними втратами за рахунок поглинання, може бути визначено згідно з виразом:

$$a = a_{pp} + a_{pm} = 4,34 \frac{8\pi^3(n_1^2-1)}{3\lambda^4} \cdot k \cdot \beta \cdot T(1 + k_n) \cdot 10^3, \quad (8.20)$$

де a - коефіцієнт загасання ОВ, дБ/км; $k_n = 0,1 \div 0,25$ - експериментальний поправочний коефіцієнт, що враховує втрати поглинання.

Дисперсія оптичного сигналу. Поряд з коефіцієнтом загасання ОВ найважливішим параметром є дисперсія, яка визначає його пропускну здатність для передачі інформації.

Дисперсія - це розсіювання в часі спектральних або модових складових

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

39

оптичного сигналу, що призводить до збільшення тривалості імпульсу оптичного випромінювання при розповсюдженні його по ОВ (рисунок 8.5) і визначається різницею квадратів тривалостей імпульсів на виході та вході ОВ:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{вих}}^2 - \tau_{\text{вх}}^2}, \quad (8.21)$$

де значення $\tau_{\text{вих}}$ та $\tau_{\text{вх}}$ - визначаються лише на рівні половини амплітуди імпульсів.

Дисперсія не лише обмежує частотний діапазон ОВ, але суттєво знижує дальність передачі сигналів, оскільки чим довша лінія, тим більше збільшення тривалості імпульсів. Дисперсія в загальному випадку визначається трьома основними факторами: різницею швидкостей поширення напрямних мод, напрямними властивостями оптичного волокна і параметрами матеріалу, з якого воно виготовлено. У зв'язку з цим основними причинами виникнення дисперсії є, з одного боку, велика кількість мод у ОВ (міжмодова дисперсія), а з іншого боку – некогерентність джерел випромінювання, які реально працюють у спектрі довжин хвиль $\Delta\lambda$ (хроматична дисперсія).

Міжмодова (модова) дисперсія переважає в багатомодовій ОВ. Вона обумовлена наявністю великої кількості мод, час поширення яких по-різному. Для ОВ зі ступінчастим профілем показника заломлення швидкість поширення електромагнітних хвиль з довжиною хвилі λ однакова і дорівнює:

$$v = c/n_1, \quad (8.22)$$

де c – швидкість світла, км/с.

У цьому випадку всі промені, що падають на торець ОВ під кутами до його осі в межах апертурного кута θ_a , рухаються в серцевині волокна по своїх зигзагоподібних лініях і при однаковій швидкості поширення досягають приймального кінця в різний час, що звичайно призводить до збільшення тривалості прийнятого імпульсу (рисунок 8.5). Всі промені, що падають на

									Арк.
									40
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ				

торець ОВ під кутами до його осі в межах $0 < \theta_n < \theta_a$, досягають приймального пристрою з деяким тимчасовим зсувом, що, природно, призводить до збільшення тривалості імпульсу, що приймається.

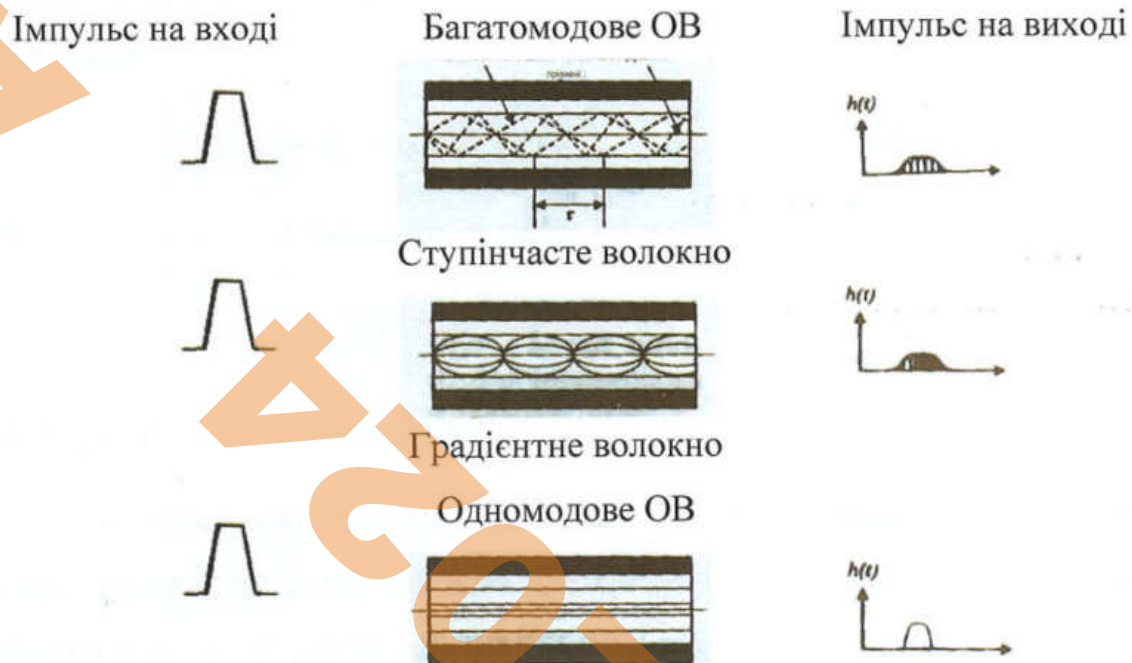


Рисунок 8.5. Поширення випромінювання по ступінчастому та градієнтному багатомодовому та одномодовому ОВ.

Міжмодова дисперсія градієнтних ОВ, як правило, на порядок і нижче, ніж у ступінчастих волокон. Це обумовлено тим, що за рахунок зменшення показника заломлення від осі ОВ до оболонки швидкість розповсюдження променів уздовж їх траєкторій змінюється так, на траєкторіях, близьких до осі, вона менша, а на віддалених, звичайно, більша. Отже, промені, що розповсюджуються найкоротшими траєкторіями (ближче до осі), мають меншу швидкість, а промені, що розповсюджуються по більш протяжних траєкторіях, мають більшу швидкість. В результаті час поширення променів вирівнюється і збільшення тривалості імпульсу стає меншим.

Розширення імпульсу через модову дисперсії характеризується часом збільшення сигналу і визначається як різниця між найбільшим і найменшим часом приходу променів у переріз світловоду на відстані l від початку.

Відповідно до законів геометричної оптики час поширення променя в ступінчастому багатомодовому ОВ залежить від кута падіння θ_n , визначається виразом:

$$t = L \cdot n_1 / c \cdot \cos \theta_n, \quad (8.23)$$

де L – довжина світловода, км; n_1 – показник заломлення серцевини ОВ; зі швидкість світла, км/с.

Так як мінімальний час поширення оптичного променя має місце при $\theta_n=0$, а максимальне при $\theta_n = \theta_{кр}$, відповідні їм значення часу поширення можна записати:

$$t_{\min} = (L \cdot n_1)/c \text{ та } t_{\max} = (L \cdot n_1)/(c \cdot \cos\theta_{кр}), \quad (8.24)$$

звідки значення міжмодової дисперсії дорівнює:

$$\tau_{\text{мм}} = t_{\max} - t_{\min} = \frac{L}{c} n_1 \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = \frac{n_1 \Delta}{c} L, \quad (8.25)$$

де $\tau_{\text{мм}}$ – міжмодова дисперсія.

З останнього виразу випливає, що міжмодова дисперсія зростає зі збільшенням довжини волокна. Однак це справедливо тільки для ідеального волокна, в якому немає взаємодії між модами. У реальних умовах наявність неоднорідностей, кручення і згинання волокна призводять до постійним переходам енергії з одних мод до інших, тобто, до взаємодії мод, у зв'язку з чим дисперсія стає пропорційною \sqrt{L} . Цей вплив проявляється не відразу, а після певної відстані проходження світлової хвилі, яка носить назву довжини зв'язку мод, що встановилася, і приймається рівним 5 – 7 км для ступінчастого волокна і 10 – 15 км – для градієнтного. Воно встановлено емпіричним шляхом.

У градієнтних багатомодових волокнах час поширення оптичних променів визначається законом зміни показника заломлення та за певних умов вирівнюється, що, природно, зменшує дисперсію. Так, при параболічному профілі показника заломлення, коли показник ступеня набуває значення $u=2$,

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L. \quad (8.26)$$

Найменший розкид групових затримок із усіх ППП, виходить за показника ступеня та $u = u_{\text{опт}}$, тобто, при $u_{\text{опт}} = 2(1 - \Delta)$. При цьому $\tau_{\text{мод}}$ досягає мінімального значення (рисунок 8.6), рівного

									Арк.
									42
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ				

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{n_1 \Delta^2}{8c} L. \quad (8.27)$$

З цього $\tau_{\text{мод}}$ може бути представлений у вигляді:

$$\Delta\tau_{\text{сп}} \cdot L = \tau_{\text{мод}}. \quad (8.28)$$

Характер кривої на малюнку свідчить, що для мінімізації дисперсії необхідно ретельно керувати значенням u , що на практиці виявляється нелегкою справою. А всяка зміна профілю, що наближається до параболічного, суттєво зменшує модову дисперсію в такому градієнтному ОВ.

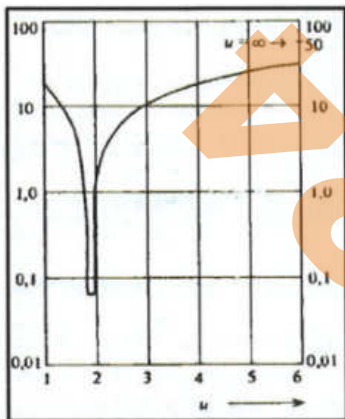


Рисунок 8.6. Залежність модової дисперсії Атол від ступеня та в градієнтних ОВ.

В інженерних розрахунках при визначенні модової дисперсії слід мати на увазі, що до певної довжини лінії L_c немає міжмодового зв'язку, а потім при $L > L_c$ відбувається процес взаємного перетворення мод і настає режим, що встановився. Тому, як видно із рисунку 8.7, спочатку, при $L < L_c$, дисперсія збільшується за лінійним законом, а потім, при $L > L_c$, - по квадратичному закону. Отже, наведені вище формули розрахунку модової дисперсії справедливі лише для довжини лінії $L < L_c$.

При довжинах лінії $L > L_c$ слід скористатися такими формулами:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{мод}} &= \frac{\Delta n_1}{c} \sqrt{LL_c} && \text{- для східчастого світловоду;} \\ \tau_{\text{мод}} &= \frac{\Delta^2 n_1}{2c} \sqrt{LL_c} && \text{- для градієнтного світловоду.} \end{aligned} \quad (8.29)$$

де L – довжина лінії, км; L_c - Довжина зв'язку мод (встановленого режиму), км.

9 ПРОЕКТНО-РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

При розробці проекту волоконно-оптичного термометра, особливістю якого є вимірювання температури на значній відстані від блоку реєстрації ($l > 1$ км) в умовах, шкідливих для здоров'я людини (радіація, потужні електромагнітні поля, вибухонебезпечні середовища), важливим є інформація про величину електричного сигналу з ВОДТ. Вибір його структурної схеми, сучасної елементної бази, яка забезпечить необхідну точність і завадостійкість вимірювання, має велике значення. Метою цієї роботи була оцінка втрат оптичного сигналу у волоконно-оптичному тракті ВОДТ. Використання в якості чутливого елемента пластин з халькогенідного скла, оптичні характеристики якого можна змінювати в широких межах, змінюючи склад халькогенідного склоподібного напівпровідника (ХСН) в межах області склоутворення, що дозволить спростити процес оптимального узгодження в системі світлодіод - чутливий елемент фотодіод. З метою усунення нестабільності джерела випромінювання і вимірювання запропонована двоканальна однопроменева схема ВОДТ. Це досягається шляхом ділення вихідних сигналів опорного і робочого каналів в електричній схемі блоку реєстрації (рисунок 9.1).

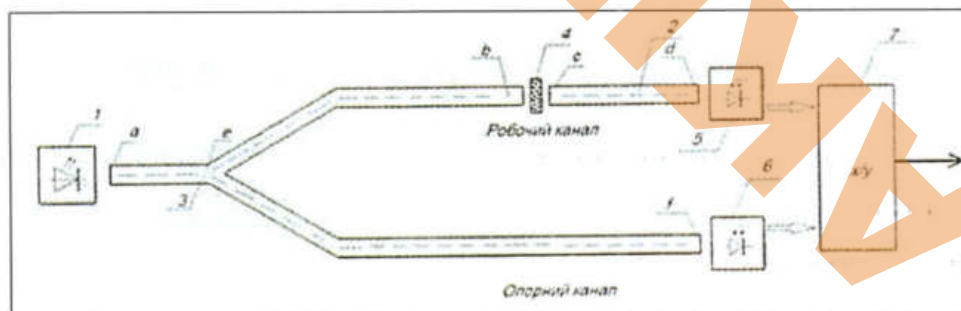


Рисунок 9.1 - Комбінована схема ВОДТ

- 1 - джерело випромінювання (світлодіод);
- 2 - багатомодове оптичне волокно;
- 3 - Y-волоконно-оптичний розгалужувач;

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

44

4 - чутливий елемент з халькогенідного скла;

5, 6 - приймачі випромінювання (фотодіоди);

7 - електричний пристрій ділення вихідних сигналів (I_0/I_p).

9.1 Термочутливий елемент

Принцип роботи ВОДТ базується на зсуві фундаментального краю оптичного пропускання пластинки ХСН при зміні температури (рисунок 9.2)

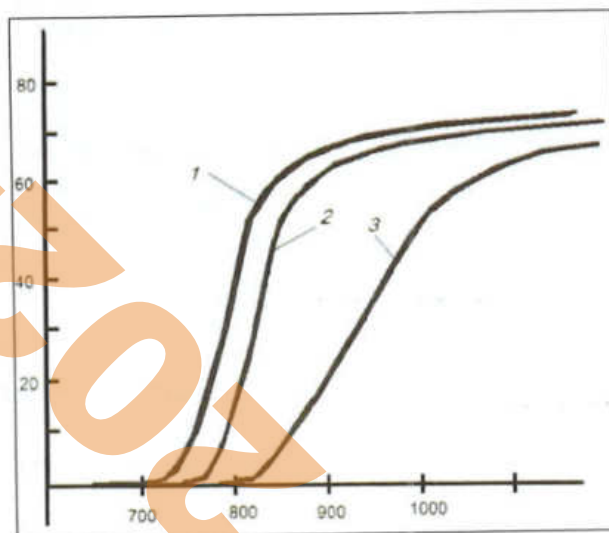


Рисунок 9.2 - Спектральна залежність пропускання халькогенідного скла $As_{45}Se_{55}$ від довжини хвилі, товщиною 0,6мм (1=291 К; 2=330 К; 3=423 К).

9.2 Технічні характеристики джерела випромінювання

Відміченим властивостям відповідає лазерний світлодіод N4808050-3-1230. Відносна спектральна характеристика потужності випромінювання приведена на рисунок 9.3

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

45

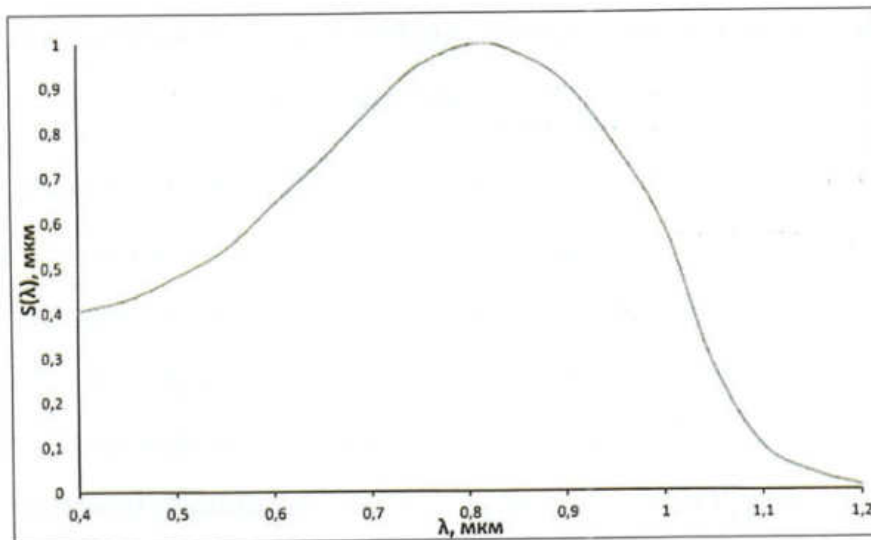


Рисунок 9.4 - Відносна спектральна характеристика чутливості фотодіода OPF432 ($\lambda_p=0,808$ мкм).

Як видно з рис. 9.3 та рис. 9.4, спектральна залежність чутливості фотодіода значно ширша в порівнянні з спектральною областю випромінювання світлодіода. Це забезпечує більш стабільну роботу обраної оптопари:

- струмова інтегральна чутливість $S_{int} \geq 0,55$ А/Вт;
- номінальна робоча напруга - $U_p = 4$ В;
- постійна часу при включенні або виключенні не більше $\tau = 0.005$ мкс;
- розмір чутливого елементу - $1,4 \times 1,4$ мм;
- плоский кут зору 2β не менше 36° .

9.3 Технічні характеристики оптичного волокна

Приведено наступні характеристики для оптичного волокна:

- матеріал волокна - кварц, легований бромом;
- показник заломлення n - 1,553 на довжині хвилі λ - 0,85 мкм;
- діаметр серцевини $d_c = 0,1$ мм;
- втрати у волокні 1 км -2,7...3,0 дБ;
- стійкість до температурних дій: висока- $+170(180)^\circ\text{C}$, низька - -60°C .

9.4 Розрахунок світлової енергії, що попадає на площадку приймача випромінювання ВОДТ

Очевидно, що величини електричних сигналів фотодіодів, опорного і робочого каналів датчика будуть в прямій залежності від світлового потоку, що попадає на них проходячи через волоконно-оптичний тракт. Оцінимо значення цієї світлової енергії, враховуючи приведені характеристики елементів датчика. Нехай струм фотодіода буде дорівнювати $I_{пр}=50$ мА при цьому інтегральна потужність випромінювання світлодіода буде становити $P_{інт}=40 \cdot 10^{-6}$ Вт. Оскільки діаметри випромінюючої площадки світлодіода і серцевини оптичного волокна різні, то при їх стиковці в оптичне волокно може зайти тільки незначна частина світлової енергії $P_{вх}$ яку можна обчислити за формулою:

$$P_{вх} = P_{інт} \cdot \frac{S_{в}}{S_{д}} \quad (9.1)$$

де $S_{в}$, $S_{д}$ - відповідно площі випромінюючої площадки світлодіода і серцевини оптичного волокна.

Враховуючи приведені технічні параметри відмічених елементів обчислимо $P_{вх} = 6,4 \cdot 10^{-6}$ Вт.

Врахуймо також ослаблення світлового променя обумовлене Френелівським відбиванням на границях оптичних середовищ, які він зустрічає на шляху поширюючись до фотодіода. При нормальному падінні променя на границю двох ізотропних середовищ його пропускання визначається з відомою формулою:

$$\tau = 1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (9.2)$$

де n_1 і n_2 показники заломлення суміжних середовищ.

На рис. 1 ці границі позначені літерами a,b,c,d, f,h для робочого каналу і літерою f для опорного каналу. В точці (с)Y - відгалуджувача будемо вважати, що інтенсивність світлового променя буде ділитися навпіл (тобто $\tau = 0.5$).

Очевидно, що результуючий коефіцієнт пропускання розглянутої оптичної системи буде визначатися як добуток коефіцієнтів на суміжних середовищах. Таким чином пропускання робочого каналу визначиться як:

$$\tau_p = \tau_a \cdot \tau_e \cdot \tau_b \cdot \tau_c \cdot \tau_d \quad (9.3)$$

Пропускання опорного каналу аналогічно буде визначатися

$$\tau_0 = \tau_a \cdot \tau_e \cdot \tau_f \quad (9.4)$$

Враховуючи приведені значення показників заломлення контактуючих середовищ, знайдемо $\tau_p = 0,2458$, $\tau_0 = 0,455$.

Енергія світлового потоку, що попадає відповідно на опорний і робочий канал буде рівна:

$$P_0 = P_{int} \cdot \tau_0 = 6.4 \cdot 0.455 = 2.912 \text{ мкВт}$$

$$P_p = P_{int} \cdot \tau_p = 6.4 \cdot 0.248 = 1.592 \text{ мкВт}$$

9.5. Розрахунок струму фотодіода

В якості приймача випромінювання в робочому і опорному каналах, як вже відмічалось, використовують фотодіоди які перетворюють потік світлового випромінювання в електричний сигнал. При аналітичних розрахунках струмів фотодіодів необхідно знати не тільки величину цих потоків але і ефективність використання фотодіодом випромінювання світлодіода, обумовлену різними спектральними розподілами випромінюючої здатності світлодіода і чутливості фотодіоду. Струм фотодіода для нашого випадку можна оцінити за формулою:

$$I_{фд} = \tau_{0,p} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_a(\lambda) \cdot p^a(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (9.5)$$

де $S^a(\lambda)$ - спектральний розподіл чутливості фотодіода в абсолютних одиницях [А/Вт];

$P^a(\lambda)$ - спектральна залежність випромінювання світлодіода в абсолютних одиницях [Вт];

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

49

$\Gamma_{o,p}$ - пропускання опорного або відповідно робочого каналів ВОДТ, ці величини будемо вважати сталими;

$\tau(\lambda)$ - спектральна залежність пропускання чутливого елемента;

$\lambda_1 - \lambda_2$ - спектральний діапазон чутливості фотодіода.

Відмітимо, що спектральні залежності $S^a(\lambda), P^a(\lambda)$ в (9.5), в літературі не приводяться, частіше приводять відносні залежності цих величин, де

$$S^B(\lambda) = \frac{S^a(\lambda)}{S_m^a(\lambda_m)} \quad (9.6)$$

$$P^B(\lambda) = \frac{P^a(\lambda)}{P_m^a(\lambda_m)} \quad (9.7)$$

$S_m^a(\lambda_m), P_m^a(\lambda_m)$ - максимальне значення чутливості S , і випромінювальної здатності P відповідно фотодіода і світлодіода на довжині хвилі λ_m , виражені в абсолютних одиницях.

Для знаходження $I_{фд}$ з виразу (9.5) необхідно знайти $S^a(\lambda), P^a(\lambda)$. Знайдемо їх з виразів (9.6) і (9.7)

$$S^a(\lambda) = S^B(\lambda) \cdot S_m^a(\lambda_m) \quad (9.8)$$

$$P^a(\lambda) = P^B(\lambda) \cdot P_m^a(\lambda_m) \quad (9.9)$$

Підставимо (9.8) і (9.9) у вираз (9.5) та отримаємо:

$$I_{фд} = \tau_0 \cdot S_m^a(\lambda) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \cdot P^B(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (9.10)$$

Величини $S_m^a(\lambda), P_m^a(\lambda)$ в довідниках також не приводяться. В технічних характеристиках для напівпровідникових приладів приводяться значення інтегральної чутливості $S_{інт}^a$ для фотодіода і випромінювальної здатності для світлодіода $P_{інт}^a$.

Інтегральні значення $S_{інт}^a, P_{інт}^a$ у відповідності до (9.8, 9.9) можуть бути

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

50

представлені у вигляді:

$$S^a = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_3} S^a(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) d\lambda} \quad (9.11)$$

де $\varepsilon(\lambda)$ - спектральний розподіл потужності випромінювання абсолютно чорного тіла. Підставивши в (9.11) замість $S^a(\lambda)$ вираз (9.8), отримаємо:

$$S_{\text{інт}}^a = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \cdot S_m^a(\lambda_m) \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) d\lambda} = S_m^a(\lambda_m) \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) d\lambda} \quad (9.12)$$

З виразу (9.12) знайдемо значення $S_m^a(\lambda_m)$:

$$S_m^a(\lambda_m) = \frac{S_{\text{інт}}^a \cdot \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \varepsilon(\lambda) d\lambda} \quad (9.13)$$

Позначимо:

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) d\lambda} = k_{\text{ачт}} \quad (9.14)$$

З врахуванням (9.14) вираз (9.13) запишемо:

$$S_m^a(\lambda_m) = \frac{S_{\text{інт}}^a}{k_{\text{ачт}}} \quad (9.15)$$

Аналогічно виразу $S_{\text{інт}}^a$ запишемо для $P_{\text{інт}}^a$:

$$P_{\text{інт}}^a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^a(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) \cdot P_m^a(\lambda_m) d\lambda = P_m^a(\lambda_m) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) d\lambda \quad (9.16)$$

Звідси:

$$P_m^a(\lambda_m) = \frac{P_{\text{інт}}^a}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) d\lambda} \quad (9.17)$$

Підставивши знайдені вирази (9.15) і (9.17) в (9.5) кінцево отримаємо вираз для $I_{\text{фл}}$:

$$I_{\text{фл}} = \tau_{0,p} \frac{S_{\text{інт}}^a \cdot P_{\text{інт}}^a}{k_{\text{ачт}}} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S^B(\lambda) \cdot P^{13}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_1} P^B(\lambda) d\lambda} \quad (9.18)$$

									Арк.
									51
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ				

Позначимо вираз

$$\beta = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s^B(\lambda) P^B \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P^B(\lambda) d\lambda} \quad (9.19)$$

З урахуванням (9.19) вираз (9.18) для опорного каналу набуде вигляду:

$$I_{\text{фдо}} = \tau_0 \frac{S_{\text{інт}}^a \cdot P_{\text{інт}}^a}{K_{\text{ачт}}} \cdot \beta \quad (9.20)$$

Аналогічно для робочого каналу ВОДТ

$$I_{\text{фдр}} = \tau_p \frac{S_{\text{інт}}^a \cdot P_{\text{інт}}^a}{K_{\text{ачт}}} \cdot \beta \quad (9.21)$$

В результаті проведених розрахунків, що встановлено, коефіцієнт використання АЧТ $K_{\text{ачт}} = 0,011$ є відносно низьким. Це зумовлено високою монохроматичністю використовуваного джерела. Розрахований за (9.20) струм опорного $I_{\text{фдо}} = 174,4$ мкА. Струм робочого каналу змінюється в діапазоні 35-5 мкА при зміні температури від 20 до 170 °С. У результаті ділення цих струмів одержуємо сигнал пропорційний зміні температури, який в наступному подається на мікроконтролер для подальшої обробки. Передавальна характеристика нашого ВОДТ зображена на рисунку 9.5.

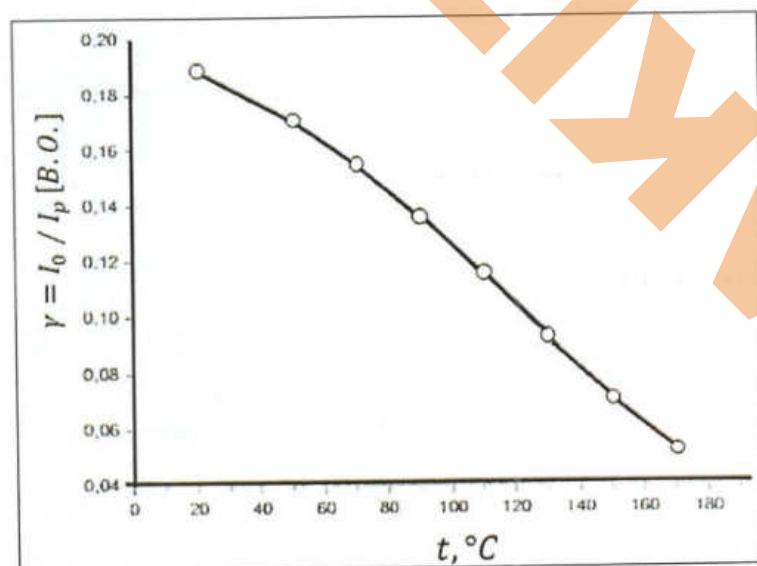


Рисунок 9.5 – Передавальна характеристика датчика

10 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМ

Структурна схема двоканального блоку реєстрації представлена на рис. 10.1.

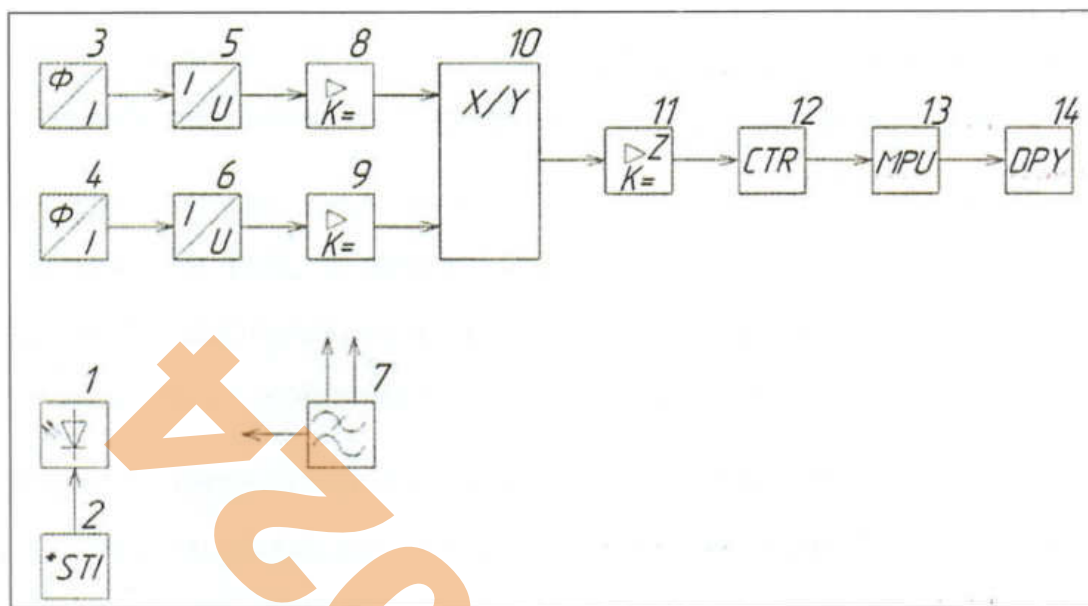


Рисунок 10.1 - Структурна схема датчика:

- 1 - світлодіод;
- 2 - стабілізатор струму;
- 3,4 - фотодіод;
- 5,6 - перетворювач струм-напруга;
- 7 - фільтр живлення;
- 8,9 - підсилювач;
- 10 - схема ділення;
- 11 - масштабний підсилювач-обмежувач;
- 12 - мікроконтролер;
- 13 - лічильник;
- 14 - дисплей.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

53

Двоканальний реєстратор будується за схемою в якій використано два ідентичні канали перетворення: перший канал (3,5,8) побудовано з використанням фотострумowego перетворювача на фотодіоді. Другий перетворювач здійснює перетворення фотоструму в напругу. Вихідну напругу вторинного перетворювача підсилює операційний підсилювач, охоплений зворотнім від'ємним зв'язком. Другий канал побудовано за такою ж схемою.

Вихідні сигнали підсилювачів (8,9) подаються на вході аналогового дільника напруги (10), з виходу якого інформативний сигнал посилюється масштабним підсилювачем (11), який забезпечує вихідний сигнал від 0 до 5 В, що достатньо для узгодження з мікропроцесорним блоком інформації.

Вхідний інформативний сигнал подається на вході волоконно-оптичного тракту від світлодіода (1), який живиться від джерела стабільного струму (2), що забезпечує однакову інтенсивність енергії випромінювання в обидвох каналах.

Живлення схеми реєстратора здійснено від зовнішнього біполярного, стабільного джерела живлення ± 15 В.

Дана структурна схема була покладена в основу принципової електричної схеми, що показана на рис. 10.3.

В якості базової схеми використано вентиляне (без зовнішнього джерела живлення) включення фотоперетворюючого діода (рис. 10.2):

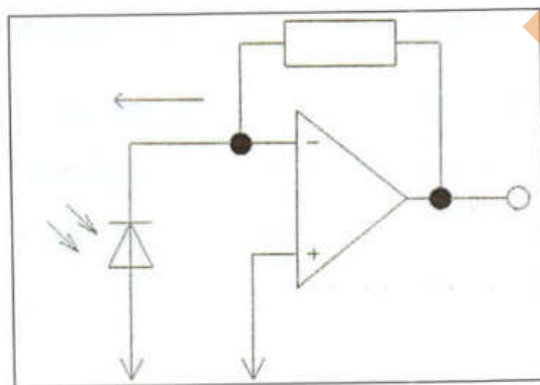


Рисунок 10.2 - Включення фотоперетворюючого діода.

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

КБР20050026ПЗ

Арк.

54

Таке включення має наступні переваги, в порівнянні з традиційним фотодіодним включенням (при наявності зовнішнього зворотнього включення фотодіода):

- нульове зміщення на фотодіоді;
- відсутність темного струму;
- лінійна залежність фотоструму від освітленості;
- малий шум при підсиленні фотосигналів.

В такому включенні практично відсутній темновий струм і джерелом шумів є тільки тепловий струм Джонсона. В якості базового фотодіода може бути використаний OPF432, специфікація якого введена нижче [12]:

- Площа: 0,2 мм
- Ємність: 50 пФ
- Паралельний опір: @ 25°C 100MΩ
- Максимальний лінійний вихідний струм: 40 мА
- Час відклику: 12нс
- Фоточутливість: 0,003 мкА/фс.

Світлодіод здійснює перетворення падаючого потоку або освітленості в фотострум, але мале значення фотоструму не дуже зручне для подальшого підсилення, тому згідно із структурною схемою було запропоновано використати додатковий перетворювач струм-напруга.

Нульова напруга на діоді підтримується потенціалом операційного підсилювача, а струм короткого замикання перетворюється в напругу. При максимальній чутливості підсилювач має реєструвати струми діода по 30 пА. Це передбачає, що резистор зворотнього зв'язку має бути досить великої величини, а вхідний струм підсилювача - досить малий. Для струму в 30 пА опір 1000 МО дасть напругу 30 мВ. Виберемо величину 1000MΩ в якості опору діапазону максимальної чутливості. Це дасть вихідну напругу 10 мВ при струмі діода

									Арк.
									55
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ				

10 пА, і 10 В при струмі 10 нА, що складає 60 дБ по динамічному діапазону. Для більш високих освітленостей, підсилення схеми слід зменшити шляхом пониження величини резистора зворотнього зв'язку.

Для отримання максимального підсилення було вибрано один каскад, а не два. Це було зроблено для того, щоб збільшити відношення сигнал-шум (С-Ш).

Якщо зменшити опір зворотнього зв'язку в два рази, рівень сигналу зменшиться в два рази, а шум резистора зменшиться тільки в $\sqrt{2}$ разів.

Для точного вимірювання струмів фотодіода в діапазоні десятків пА, вхідний струм ОП має бути не більше декількох одиниць пА. Це суттєво звужує область вибору операційних підсилювачів, індустріально стандартний ОР07 з ультра низькою напругою зміщення (10 мкВ) і біполярною технологією має неприйнятно високий вхідний струм 4 нА. Навіть супер-бета біполярні ОП з компенсацією вхідного струму мають вхідні струми порядку 100 пА при кімнатній температурі і підійдуть тільки для додатків, що використовуються при дуже високих температурах, оскільки тут вхідні струми не подвоюються на кожні 10°C збільшення температури як відбувається у випадку із FET

каскадами. Для нашого підсилювача був вибраний електрометричний операційний підсилювач.

В якості базових ОП в роботі [13] рекомендовано застосування електрометричних операційних підсилювачів з польовими транзисторами на входах. Характеристики яких приведені в таблиці 10.1

Таблиця 10.1 Характеристика польових транзисторів

Пристрій	Vos MAX	Vos MAX	IbVos MAX	Шум 0.1-10ГЦ	Корпус
AD549	250 мкВ	250 мкВ	100 пФ	4 мкВ р-р	ТО-99
AD645	250 мкВ	250 мкВ	1,5 пА	2 мкВ р-р	ТО-99, DIP
AD795	250 мкВ	250 мкВ	1пА	2,5 мкВ р-р	SOIC, DIP

Вихідні сигнали з двох каналів фотоперетворення надходять на вході x і z схеми ділення напруги, яка реалізована на мікросхемі.

Сигнал x і z є інформаційним параметром, що знімається з виходу мікросхеми DA4. Вихідний сигнал цієї МС в аналоговому представленні може регулюватися резистором R11 і в подальшому може бути підсилений операційним підсилювачем DA3.2, який представляє собою інвертуючий підсилювач, в зворотній зв'язок якого включений стабілітрон VD4, який здійснює обмеження вихідного сигналу на рівні 4,7-4,8 В.

Схема випромінюючого живлення діода VD3 побудована за класичною схемою перетворювача напруга-струм в якій управляючим елементом є ОП DA3.1, а виконуючим - біполярний транзистор VT1.

Вихідний сигнал обробляється цифровим вольтметром побудованим на мікроконтролері PIC16F. Вхідний сигнал подається на каскад корекції (елементи C3, R17 і R18) Далі сигнал надходить на вхід мікроконтролера у якому і відбувається вимірювання значень напруги. Обчислювальна потужність даного мікроконтролера дозволяє виконати внутрішнє перетворення значень вхідної напруги на відповідні значення температури.

З мікроконтролера DD1 визначене значення температури передається на семисегментний, чотирьох елементний індикатор HG1, що служить вузлом виведення інформації (значень температури).

					КБР20050026ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

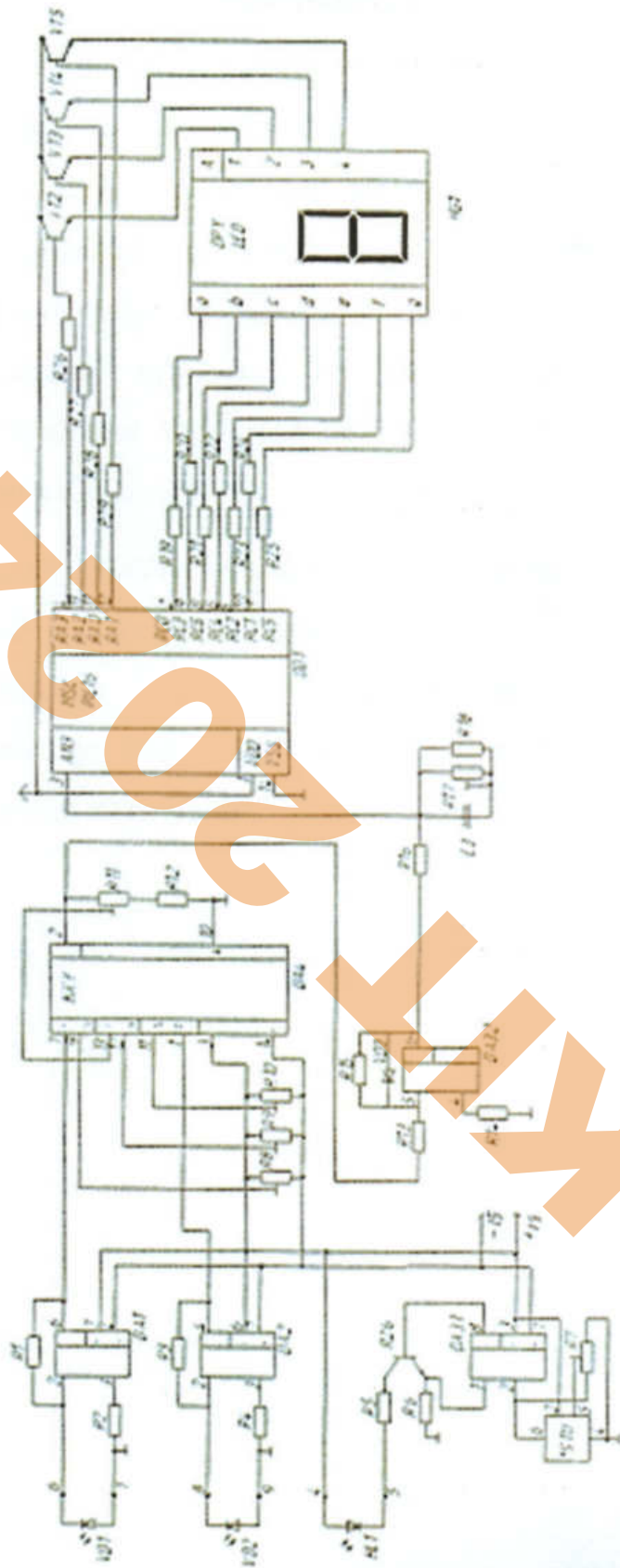


Рисунок 10.3 – Електрична принципова схема датчика

				КБР20050026ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		
					58	

ВИСНОВКИ

1. Розроблена структурна схема приладу до складу якої входить Y-відгалужувач.
2. Розроблена принципова електрична схема.
3. Розрахована передавальна характеристика.

Було визначено робочий діапазон температур для розроблюваного датчика температури. Теоретично було розраховано струм діода та значення енергії, що припадає на площадку приймача випромінювання волоконно-оптичного датчика. Ширина діапазону вимірюваних температур складає від -30°C до $+150^{\circ}\text{C}$. Втрати у волокні складають 2,7...3,0 дБ на 1 км.

Запропонований в роботі волоконно-оптичний датчик температури може бути використаний в системах терморегуляції і кондиціонування різних складських, виробничих і сільськогосподарських приміщень (наприклад, теплиць), а також у важких умовах агресивних середовищ, сильних електромагнітних полів та радіацій.

									Арк.
									59
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР 20050026ПЗ				

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Hordvik A., Berg A., Thingl D. Proceedings IX European Conference on optical Communication. North-Holland: 1983. P. 317.
2. Grace S., West R. H. Nuclear radiation effects on optics // Fibre optics. Conference proceedings. Institute of Electronic and Radio Engineers. London: 1982. No 53. P. 121-128.
3. Kyuma K. Fiber-optic instrument for temperature measurement // IEEF Journal. 1982. Vol. QE-18, No 4. P. 676-679.
4. Jones B. E. Simple optical sensors for the process industries using incoherent light // Optical Sensor and Optical Techniques in Instrumentation. London: 1981. P. 1-15.
5. Udalov N. P., Busurin V. I. Optoelectronic transducers based on controlled light guide structure // IMEKO 9-th World Congress. Berlin: 1982. Vol. VI. P. 61-65.
6. Cielj P., Lappierre J. Fiber optic ultrasound sensing for the evaluation of materials // Applied Optics. 1982. Vol. 21. P. 572-575.
7. Оптоэлектронные преобразователи на основе управляемых световодных структур / В. И. Бусурин, В. Ф. Лярский, В. И. Садовников, Н. П. Удалов. М.: Радио и связь, 1984.
8. Затыкин А. А., Моршнеv С. К., Францессон А. В. Взаимодействие излучения с поглощающей средой на участке световода с крутым изгибом // Квантовая электроника. 1983. No 11. С. 2283-2288.
9. Иоргачев Д.В, Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи" 2002
10. Туряниця, І. І. Чутливий елемент волоконно-оптичного датчика температури, його виготовлення і оптимізація характеристик. [Текст] / І. І. Туряниця, О. В. Козусенок, І. І. Чичура // Науковий вісник Ужгородського університету : Серія: Фізика. - Ужгород: Говерла, 2013. - Вип.33. - С. 175-180. - Бібліогр.: с. 179-180 (7 назв).

										Арк.
										60
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	КБР20050026ПЗ					

11. Андрушко Л.М. Вознесенский В.А. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи.-М.:Радио и связь.
12. Электронный ресурс доступ:
<https://datasheetspdf.com/datasheet/OPF432.html>
13. Батурин В.И. Оптоэлектронные преобразователи. Электронная
14. техника в автоматика / Батурин В.И., Голубев С.С.

ТЕХНИКА

					КБР20050026ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		61

ДОДАТКИ