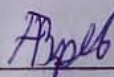


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

Бакалаврська дипломна робота на тему:

РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ОЦІНЮВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ГРУПОВОЇ
ЗАТРИМКИ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-20 б
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка



Превор І.А.

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІКСТ
Кичак В.М.

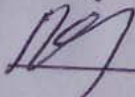
« 11 » 06 2024 р.

Опонент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС
Семенов А.О.

« 11 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ



д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 06 2024 р.

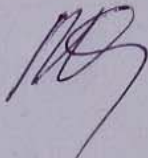
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

«06» 05 2024 року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Превору Івану Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів

керівник роботи Кичак Василь Мартинович, доктор техн. наук, професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від «11» березня 2024 року № 80

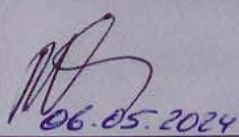
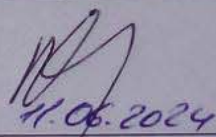
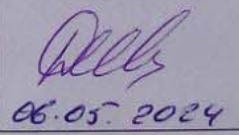
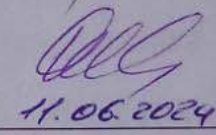
2. Строк подання студентом роботи: 07 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Розробити алгоритм і програму оцінювання групової затримки сигналів в оптичній мережі. Дослідити функцію розподілу групових ймовірностей ДГЗ. Дослідити залежність коефіцієнта згасань та дисперсії довжини хвилі оптичного сигналу. Провести дослідження залежності ДГЗ від довжини хвилі оптичного сигналу. Кількість довжин хвиль $k=40$. Кількість сегментів $N=100$.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): Розглянути особливості проходження оптичних сигналів у колах волоконно-оптичної системи зв'язку. Провести аналіз впливу дисперсії сигналів на процес розповсюдження оптичних сигналів. Дослідити функцію розподілу густини ймовірностей ДГЗ. Оцінити ДГЗ оптичного сигналу. Розробити алгоритм і програму оцінювання ДГЗ. Провести моделювання ДГЗ оптичних сигналів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
залежність коефіцієнта згасань оптичних сигналів від довжини хвилі, залежність коефіцієнта дисперсії оптичних сигналів від довжини хвилі, густина розподілу ймовірності нормованого значення ДГЗ, теоретичний і емпіричний розподіл ДГЗ, блок-схема алгоритму моделювання ПМД, залежність ДГЗ від вектора вхідного випромінювання, залежність ДГЗ від довжини хвиль.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кичак В.М., професор кафедри ІКСТ	 06.05.2024	 11.06.2024
Охорона праці	Дембіцька С. В. професор кафедри БЖДПБ	 06.05.2024	 11.06.2024

7. Дата видачі завдіуання «06» травня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

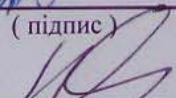
№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської дипломної роботи (БДР)	06.05.2024р.	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	20.05.2024р.	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	31.05.2024р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	04.06.2024р.	
5	Нормоконтроль БДР	05.06.2024р.	
6	Попередній захист БДР	06.06.2024р.	
7	Рецензування БДР	07.06.2024р.	
8	Захист БДР	12.06.2024р.	

Студент


 (підпис)

Превор І.А.

Керівник роботи


 (підпис)

Кичак В.М.

АНОТАЦІЯ

Розробка програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів. Бакалаврська дипломна робота / І.А. Превор – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 73 с., 14 рис., 10 табл., 17 дж. – українською мовою.

Метою даної роботи є розробка алгоритму та програм для дослідження впливу поляризаційної модової дисперсії на диференціальну групову затримку оптичних сигналів.

Розглянуто особливості проходження оптичних сигналів у колах волоконно-оптичної системи зв'язку. Проведено аналіз впливу дисперсії сигналів на процес розповсюдження оптичних сигналів. Досліджено функцію розподілу густини ймовірностей ДГЗ. Оцінено диференціальну групу затримки оптичного сигналу. Розроблено алгоритм і програму оцінювання диференціальної групи затримки. Проведено моделювання диференціальної групи затримки оптичних сигналів.

Виконано розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

ABSTRACT

Development of a program for evaluating the differential group delay of optical signals. Bachelor thesis / I.A. Prevor - Vinnytsia: VNTU, 2024. - 73 pp., 14 fig., 10 tables, 17 pages. - In ukrainian.

The purpose of this work is to develop an algorithm and programs for studying the effect of polarization mode dispersion on the differential group delay of optical signals.

The peculiarities of the passage of optical signals in the circles of the fiber-optic communication system are considered. An analysis of the influence of signal dispersion on the process of propagation of optical signals was carried out. The distribution function of the probability density of the DZS was studied. The differential delay group of the optical signal is estimated. An algorithm and a program for estimating the differential delay group have been developed. Modeling of the differential delay group of optical signals was carried out.

The section on labor protection and life safety has been completed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОСОБЛИВОСТІ ПРОХОДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ У КОЛАХ ЗВ'ЯЗКУ	7
1.1 Розповсюдження оптичних хвиль в оптичних волокнах.....	7
1.2 Згасання оптичних сигналів в оптичних волокнах.....	11
1.3 Дисперсія сигналів в оптичних волокнах.....	15
1.4 Висновки до розділу.....	25
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ.....	26
2.1 Оцінювання диференціальної групової затримки оптичного сигналу.....	26
2.2 Моделювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів ..	31
2.3 Висновки до розділу.....	37
3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ ОЦІНЮВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ГРУПОВОЇ ЗАТРИМКИ.....	39
3.1 Розробка алгоритму оцінювання диференціальної групової затримки.....	39
3.2 Розробка програми та аналіз результатів досліджень диференціальної групової затримки оптичних сигналів.....	41
3.3 Висновки до розділу.....	48
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	50
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	51
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	54
4.2.1 Мікроклімат.....	54
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	54
4.2.3 Виробниче освітлення	56
4.2.4 Виробничий шум.....	57
4.2.5 Виробничі випромінювання.....	58
4.3 Пожежна безпека.....	59
4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі.....	59

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	60
4.4 Висновки до розділу.....	61
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал	66
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	72

ВСТУП

Актуальність теми. За останній період розвитку в галузі телекомунікацій найбільшого поширення набули волоконно-оптичні кабелі та волоконно-оптичні системи передавання інформації (ВОСП), які за своїми характеристиками набагато перевершують усі традиційні кабелі зв'язку. Зв'язок по волоконно-оптичним кабелям є одним із головних напрямків науково-технічного прогресу в галузі телекомунікацій.

При застосуванні волоконно-оптичного зв'язку різко збільшується обсяг інформації, що передається у порівнянні з такими широко відомими засобами як супутниковий зв'язок і радіорелейні лінії.

Це пояснюється тим, що волоконно-оптичні системи передавання характеризуються широкою смугою поширення [1, 2].

Первинний розвиток ВОПС йшов у напрямі створення оптоволоконних елементів (джерел випромінювання та приймання оптичного сигналу) і обладнання цими елементами канално-утворювального устаткування цифрових систем передавання (ЦСП) і приймання інформації (ПЦІ).

Поява цифрової синхронної ієрархії, спеціально розробленої з метою застосування переваг оптичного волокна (ОВ) вивела розвиток ВОПС інформації на новий рівень. Проте розвиток технології ВОПС триває.

Створення високонадійних оптичних кабелів зв'язку стало можливим у результаті розробки оптичних волокон з малими втратами. Такі волокна в значній мірі стимулюють розробку спеціалізованого устаткування й елементів лінійного тракту оптичних кабельних систем передавання (генераторів, приймачів, роз'ємних і нероз'ємних з'єднувачів розгалужувачів та інших елементів) [3, 4].

При розповсюдженні оптичних елементів в оптичних каналах зв'язку має місце їх згасання та змінюється не лише амплітуда, але і форма імпульсів, імпульси розширюються. Збільшення тривалості оптичних імпульсів при прийомі на заданій довжині оптичного волокна визначає граничну швидкість

передавання сигналів по цій лінії зв'язку. Одним із параметрів, який визначає швидкість передавання сигналів є диференціальна групова затримка, оцінюванню якої присвячена дана робота.

Аналіз останніх досліджень. Питанням дослідження впливу поляризаційно-модової дисперсії та оцінювання диференціальної групової затримки присвячені праці [5, 6]. В цих працях розглянуто особливості розповсюдження оптичних сигналів у волоконно-оптичних лініях зв'язку, запропоновано пристрої композиції дисперсії, розглянуто основні принципи її виникнення, показано, що збільшення тривалості передавання оптичних імпульсів через оптоволокно зумовлене міжмодовою дисперсією. При цьому тривалість передачі оптичних сигналів зменшується зі зменшенням різниці показників заломлення сердцевини і оболонки [6, 7]. В цих працях показано, що в реальних волокнах наявність псевдонерідностей викликає взаємодію хвиль, які поширюються на ці ефекти, є помітними при певній довжині волокна. Під час поширення спрямованих мод по ОВ змінюється фазові швидкості, які створюють різницю в часовій затримці між складовими оптичного сигналу, що приводить до збільшення тривалості вихідного оптичного імпульсу.

Мета та постановка задачі. Метою цієї роботи є розробка алгоритму та програм для дослідження впливу поляризаційно-модової дисперсії на диференціальну групову затримку оптичних сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- розглянути особливості розповсюдження оптичних хвиль в оптичних волокнах;
- оцінити коефіцієнт згасання оптичних сигналів, який обумовлений власними втратами потужності переданого сигналу;
- оцінити залежність ДГЗ від вектора вхідного випромінювання та довжини хвилі.

Об'єкт дослідження є процес розповсюдження оптичних сигналів у волоконно-оптичних сигналах зв'язку.

Предмет дослідження є методи та алгоритми оцінювання величини диференціальної групової затримки оптичних сигналів.

Методи досліджень. Для розв'язання поставлених задач завдань використовувались основи теорії передачі інформації, основи теорії моделювання волоконно-оптичних систем передавання інформації, основи програмування.

Новизна одержаних результатів:

- розроблено алгоритм оцінювання диференціальної групової затримки;
- проведено аналіз факторів, які обмежують довжину ділянки регенерації системи лінійного передавання.

Досліджено розподіл густини імовірності нормованого значення ДГЗ.

Розроблено алгоритм моделювання ПМД.

Досліджено залежність ДГЗ від вектора вхідного випромінювання.

Практичне значення результатів досліджено на базі розробленого алгоритму розроблених програмою моделювання оптичного волокна з поляризаційно модовою дисперсією, що дає можливість визначити величину ДГЗ для різної кількості довжин хвиль.

Апробація результатів.

Результати роботи доповідались на науковому семінарі кафедри інформаційних систем та технологій ВНТУ у 2024 році.

1 ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

1.1 Розповсюдження оптичних сигналів в оптичних волокнах

Давайте поглянемо на процес проходження оптичних променів через оптичні волокна більш детально, використовуючи променеву теорію передачі сигналів через оптичні волокна, яка описана на рисунку 1.1. З цього малюнка стає зрозумілим, що між довжиною хвилі λ , діаметром серцевини d та кутом падіння θ_{Π} існує відношення: $\cos\theta_{\Pi} = \lambda/d$. Це відношення може мати три можливі випадки [1]:

1. При дуже малих довжинах хвиль (коли λ наближається до нуля, а частота $f = c/\lambda$ наближається до нескінченності) кут падіння θ_{Π} наближається до 90° . В такому випадку кількість відображень при поширенні променя невелика, тому промінь спрямовується до прямолінійного руху вздовж осі оптичного волокна, що сприяє оптимальній передачі сигналу. (Рис. 1.1, а).

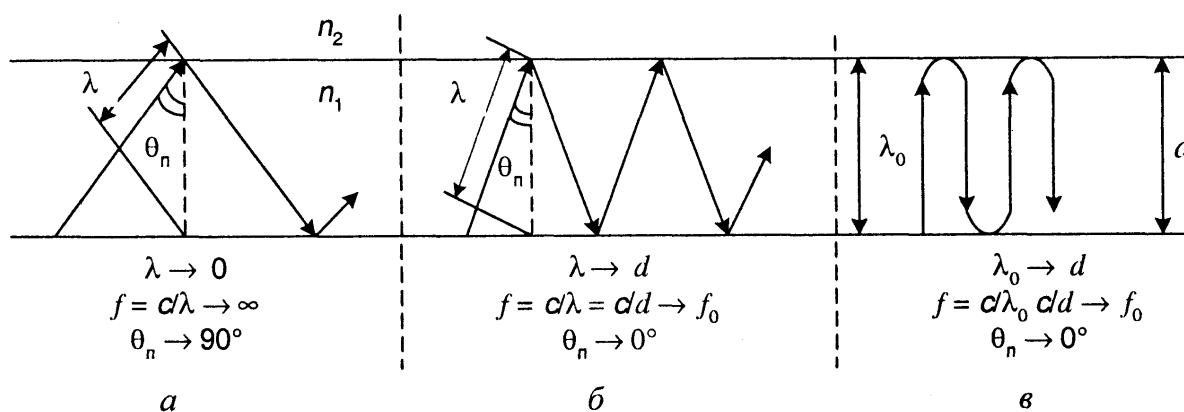


Рисунок 1.1 – Відображення процесу проходження по оптичним волокнам оптичних променів

2. Коли довжина хвилі λ наближається до діаметра серцевини d , а частота $f = c/\lambda$ (де c - швидкість світла) наближається до c/d , кут падіння θ_{Π} зменшується до 0. У цьому випадку промінь світла відбивається багато разів, і його рух стає майже незначним. Це призводить до неоптимальної передачі

оптичного сигналу, оскільки сигнал втрачається через велику кількість відображень (рис. 1.1, б).

3. Якщо початкова довжина хвилі $\lambda_0 = d$, частота $f_0 = c/\lambda_0 = c/d_0$ та кут падіння $\theta_{\Pi} = 0$ то при цьому промінь світла відбивається від межі між серцевиною та оболонкою оптичного волокна перпендикулярно. У серцевині волокна виникає стояча хвиля, і оптична потужність не передається через волокно. Цей випадок відповідає критичній довжині хвилі (рис. 1.1, в). Цей випадок відповідає критичній довжині хвилі λ_0 і критичній частоті f_0 електромагнітного коливання оптичного випромінювання.

Так, в оптичному волокні можуть поширюватися лише ті хвилі, довжина яких менша за діаметр його серцевини. Наприклад, практично використовуються хвилі з довжиною приблизно $\lambda = 1,3$ або $1,55$ мкм, що значно менше діаметра серцевини $d = 50$ або $62,5$ мкм багатомодових оптичних волокон (БОВ). Ця умова $\lambda < d$ також виконується для БОВ з меншим діаметром, наприклад, від 8 до 10 мікрометрів.

Проаналізувавши вираз $\cos\theta_{\Pi} = \lambda/d$ та формулу $\sin^2\theta_{\Pi} + \cos^2\theta_{\Pi} = 1$ маємо $\cos\theta_{\Pi} = \sqrt{1 - \sin^2\theta_{\Pi}}$. Підставивши сюди умову повного внутрішнього відображення $\sin\theta_{\Pi} = n_2/n_1$, будемо мати $\cos\theta_{\Pi} = \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$. Для отримання виразу для критичної довжини хвилі необхідно прирівняти праві частини косінусів, тоді отримаємо такий вираз:

$$\lambda_0 = \frac{d}{n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.1)$$

Вираз $f_0 = v_1/\lambda_0$ визначає критичну частоту оптичного коливання, де швидкість розповсюдження оптичного сигналу в середовищі ОВ це v_1 : $v_1 = c/n_1$. Підставимо в формулу для критичної частоти вирази λ_0 і v_1 отримаємо:

$$f_0 = \frac{c}{d\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}. \quad (1.2)$$

Співвідношення для λ_0 і f_0 дозволяють зробити такі висновки:

1. Зростання діаметра серцевини оптичного волокна ($d = 2a$) разом з підвищенням показників заломлення серцевини та оболонки n_1 і n_2 сприяє збільшенню критичної довжини хвилі і зниженню критичної частоти

2. При умові, коли показники заломлення серцевини і оболонки однакові ($n_1 = n_2$), критична довжина хвилі стає нульовою ($\lambda_0 = 0$), а критична частота наближається до нескінченності ($f_0 \rightarrow \infty$). Це означає, що передача сигналу через таке оптичне волокно стає неможливою.

Логічне обґрунтування цього висновку полягає в тому, що у випадку, коли немає межі між серцевиною та оболонкою оптичного волокна, середовище втрачає свою властивість, а саме діяти як направляюче середовище.

3. Оптичні волокна мають критичну частоту, відому як частота відсічення (f_0), вищу за яку вони ведуть себе як фільтри верхніх частот. Після цієї точки (по ОВ) можлива передача лише тих хвиль, довжина яких менша за критичну довжину хвилі (λ_0). При частоті оптичних сигналів, що перевищує f_0 , їх енергія концентрується всередині середини оптичного волокна і поширюється вздовж нього. Однак оптичні сигнали з частотою менше за f_0 розсіюються в навколишньому просторі і не передаються по оптичному волокну.

Короткий огляд передачі оптичних сигналів на основі променевої теорії відповідає лише оптичним волокнам, де довжина хвилі значно менша за діаметр серцевини ($\lambda \ll d$). У цих волокнах оптичні промені поширюються за законами геометричної оптики.

Однак, якщо розміри поперечного перерізу серцевини оптичного волокна порівняні з довжиною хвилі оптичного випромінювання, для аналізу поширення оптичного випромінювання необхідно використовувати хвильову теорію.

Хвильова теорія розглядає передачу сигналів по оптичним волокнам як процес розповсюдження різних видів електромагнітних хвиль. Для аналізу цього процесу необхідно розв'язати хвильове рівняння Максвелла у циліндричній системі координат. В цьому тексті рішення не наводиться, але його можна знайти в джерелі [2]. Це рівняння має кілька рішень, кожне з яких відповідає коливанням з певною просторовою структурою електричного і магнітного полів і відповідної фазової швидкості. Кожне з цих коливань має свій тип хвилі або моду. Оптичне випромінювання, що передається по оптичним волокнам, можна представити як суперпозицію таких мод, тобто як результат складання поширених коливань.

Два типи хвиль можуть існувати у оптичному волокні: симетричні (E_{0m} , H_{0m}) і несиметричні (дипольні) EH_{nm} , HE_{nm} , де n і m – число змін електромагнітного поля по діаметру і довжині ОВ відповідно. Згідно з хвильовою теорією, в оптичне волокно передається обмежена кількість хвиль, яку можна розрахувати, якщо відомі довжина хвилі, діаметр серцевини волокна і різниця показників заломлення серцевини та оболонки.

Основна мода утворюється променем, який спрямовується вздовж осі оптичного волокна, оскільки лише параметри поширення осьового променя не залежать від умов відображення на межі "серцевина - оболонка". Відповідно до цього, шляхом підбору параметрів оптичного волокна можна отримати режим поширення лише однієї несиметричної моди типу HE_{nm} .

Оптичне волокно, у якому поширюється лише одна хвиля (мода) типу HE_{nm} називається одномодовим.

Узагальненим показником v характеризує зазвичай режим роботи ОВ який поєднує діаметр, серцевини $d=2a$, коефіцієнти заломлення n_1 і n_2 і довжину хвилі оптичного випромінювання λ . Даний параметр називаються нормованою частотою і визначаються виразом:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.3)$$

Режим одномодового роботу досягається, коли значення параметра v знаходиться в межах від 0 до 2,405. Для заданої довжини хвилі λ цю умову можна виконати, змінюючи або різницю показників преломлення ($n_1 - n_2$), або радіус серцевини оптичного волокна.

Для стандартного випадку, коли $n_1 = 1,5$; n_1 і $n_2 = 1,49$, отримуємо формулу $v = 0,6 \cdot a / \lambda$, де λ - довжина хвилі, а максимальний діаметр серцевини оптичного волокна при $\lambda = 1,6$ мкм складає 12,8 мкм.

Однією з переваг одномодових оптичних волокон є широкий діапазон частот (велика пропускна здатність), що дозволяє їх використовувати в основному на магістральних мережах для забезпечення великого зони покриття та високої швидкості передачі оптичних сигналів.

Згідно з Рекомендацією ITU-T G.958, в системах передачі SDH, де використовуються швидкості передачі до 40 Гбіт/с, оптичні одномодові волокна (ООВ) використовуються як основне середовище для побудови систем лінійного передавання.

При збільшенні діаметра серцевини ООВ, а отже, і нормованої частоти, кількість типів передаваних мод різко зростає.

Оптичне волокно, в якому поширюється дві або більше мод, називається многомодовим. Можна довести, що при однаковій нормованій частоті кількість мод у багатомодовому оптичному волокні (БОВ) з параболічним профілем заломлення зменшується вдвічі порівняно з волокном із ступінчастим профілем заломлення.

1.2 Згасання оптичних сигналів в оптичних волокнах

Згасання сигналів в оптичних волокнах (ОВ) оптичного кабелю є одним з основних факторів, які обмежують довжину ділянки регенерації систем лінійного передавання (СЛТ). Коефіцієнт згасання α [дБ/км] обумовлений власними втратами потужності переданого оптичного сигналу в окремо взятому оптичному волокні - α_c , а також додатковими втратами, що виникають

у тому ж оптичному волокні при його розміщенні у виготовленому кабелі - $\alpha_{\text{к}}$.
Тобто, $\alpha = \alpha_{\text{с}} + \alpha_{\text{к}}$.

Власні втрати в основному визначаються трьома факторами:

- 1) витрата енергії на діелектричну поляризацію матеріалу оптичного волокна – $\alpha_{\text{п}}$;
- 2) розсіювання енергії в навколишній простір – $\alpha_{\text{р}}$;
- 3) поглинання енергії сторонніми домішками у матеріалі ОВ – $\alpha_{\text{пр}}$ тобто $\alpha_{\text{с}} = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{пр}}$.

Розглянемо коротко кожен із зазначених факторів.

Тангенс кута діелектричних втрат матеріалу ОВ $\text{tg}\delta$ з показником заломлення n , який має комплексний характер ($n = n_{\text{д}} + jn_{\text{м}}$), пов'язаний з наступним виразом:

$$\text{tg}\delta = \frac{2n_{\text{д}}n_{\text{м}}}{(n_{\text{д}}^2 - n_{\text{м}}^2)} \quad (1.4)$$

Коефіцієнт загасання $\alpha_{\text{п}}$ залежить від властивостей матеріалу оптичного волокна і довжини хвилі переданого оптичного сигналу. Його визначають за такою формулою:

$$\alpha_{\text{п}} = \pi n \text{tg}\delta / \lambda \quad (1.5)$$

Підставляючи у вираз формулу для $\text{tg}\delta$ і враховуючи, що $\lambda = c/f$ и $c/n = v$, отримаємо:

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{\omega n_{\text{д}} n_{\text{м}}}{v(n_{\text{д}}^2 - n_{\text{м}}^2)} \quad (1.6)$$

Отриманий вираз свідчить, що частотна залежність $\alpha_{\text{п}}$ є лінійною. Якщо коефіцієнт заломлення має дійсне значення $n = n_{\text{д}}$, то $\text{tg}\delta = 0$, що означає відсутність втрат на діелектричну поляризацію матеріалу ОВ ($\alpha_{\text{п}} = 0$).

Основні втрати внаслідок розсіювання викликані переважно неоднорідностями показника заломлення матеріалу ОВ та його тепловими флуктуаціями. Ці неоднорідності виникають під час виготовлення скла і залишаються «замороженими» у його масі. Ці втрати залежать від довжини хвилі за законом $1/\lambda^4$ і відомі як релеєвське розсіювання.

Коефіцієнт згасання α_p визначають за наступною формулою:

$$\alpha_p = K_p/\lambda \quad (1.7)$$

де K_p – коефіцієнт розсіювання, для кварцу він має значення 1...1,5. Втрати на релеєвське розсіювання визначають нижню межу втрат, яку можна досягти у матеріалах для оптичних волокон в ідеальних умовах. Ця межа різна для хвиль різної довжини і зменшується зі збільшенням довжини хвилі λ .

Втрати оптичного сигналу значно зростають при наявності в матеріалі оптичного волокна сторонніх домішок, таких як іони металів перехідної групи Fe^{2+} , Cu^{2+} , і іони гідроксильних груп ОН та інші. Присутність цих домішок спричиняє збільшення втрат в оптичному волокні і призводить до появи резонансних піків згасання на довжинах хвиль 0,95; 1,24; 1,39 мкм. Вміст домішок повинен бути надзвичайно низьким. Наприклад, концентрація (виражена в масі) іонів типу ОН на рівні приблизно 10^{-6} на довжині хвилі 1,39 мкм може викликати максимальні значення коефіцієнта поглинання наближено 40 дБ/км.

Коефіцієнт згасання $\alpha_{пр}$ при цьому визначається за наступною формулою:

$$\alpha_{пр} = K_{пр}e^{-k/\pi}, \quad (1.8)$$

де коефіцієнти $K_{пр}$ і k мають значення: $K_{пр} \approx 1,1...1,3$; $k \approx (0,5... 0,8) \times 10^{-6}$.

Експериментальна залежність коефіцієнта загасання власних втрат α_c від довжини хвилі переданого оптичного сигналу λ в оптичних одномодових волокнах з германосилікатного скла (крива 1) показана на рис. 1.2. Також на

цьому графіку показані теоретичні залежності, обумовлені релеевським розсіюванням (крива 2) та інфрачервоним поглинанням (крива 3). З рисунка видно, що в довгохвильовій області є два "вікна прозорості" - на довжинах хвиль 1,3 та 1,55 мкм, де коефіцієнти загасання мають значення приблизно 0,35–0,4 та 0,18–0,22 дБ/км відповідно. [3, 4].

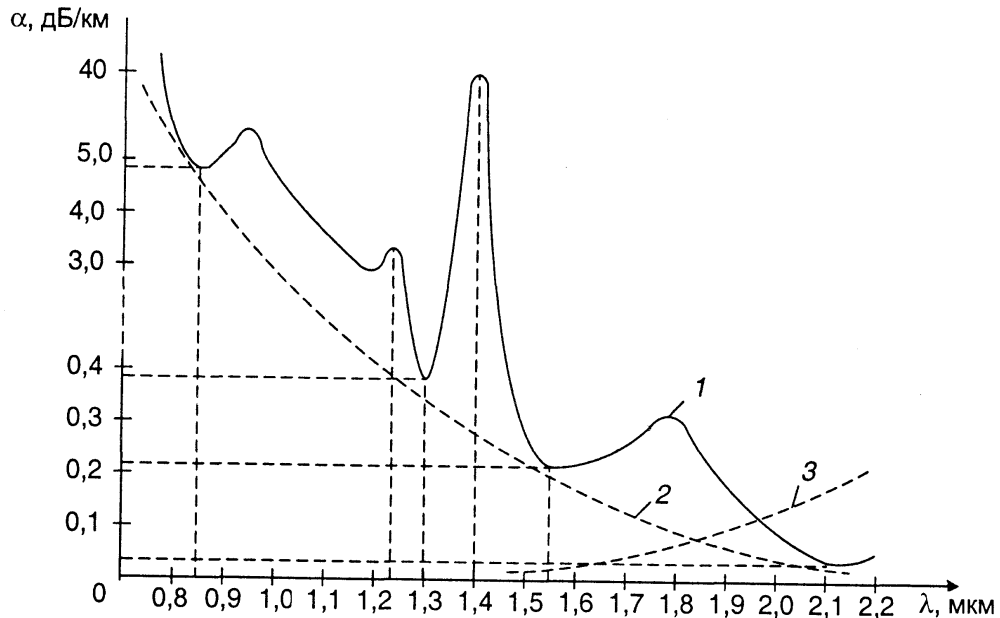


Рисунок 1.2 – Експериментальна залежність коефіцієнта загасання власних втрат α_c від довжини хвилі переданого оптичного сигналу λ в ООВ з германосилікатного скла

Можна визначити, що під час будівництва систем лінійного передавання використовуються лише оптичні кабелі з одномодовими оптичними волокнами, у яких коефіцієнти загасання на довжинах хвиль 1,3 і 1,55 мкм мають зазначені вище значення. Це дозволяє досягти оптичної зв'язності завдовжки 50–60 км і 80–120 км відповідно. [3].

Додаткові втрати потужності оптичних сигналів виникають в оптичних волокнах внаслідок накладання полімерного захисного покриття і деформації при складанні кабелю. Захисне покриття призначене для підвищення механічної міцності оптичного волокна та зменшення перехідних перешкод між волокнами при їх щільному укладанні в кабелі. Чим товще оболонка оптичного волокна, тим менше електромагнітного поля спрямованих мод на її зовнішній

межі з захисним покриттям і, отже, менші додаткові втрати в захисному покритті. Однак надмірне збільшення товщини оболонки не рекомендується з ряду причин, таких як погіршення гнучкості кабелю, збільшення його маси, вартості тощо. Тому типові оптичні волокна мають розміри 62,5/125 або 50/125 мікрон, що відповідає відношенню $b/a = 2$ або $b/a = 2,5$. При цьому коефіцієнт загасання у захисному покритті не перевищує 0,1 дБ/км.

Щодо оптичних одномодових волокон (ООВ), то вони мають інше співвідношення між зазначеними геометричними розмірами. Це пояснюється тим, що електромагнітне поле основної моди НЕІ проникає в оболонку на значну глибину, і товщина оболонки ООВ має бути суттєво збільшена порівняно з радіусом серцевини, щоб запобігти зростанню втрат у захисному покритті.

Для забезпечення дуже малих додаткових втрат товщина оболонки повинна бути приблизно в 10 разів більше, ніж радіус серцевини. Оскільки для забезпечення режиму поширення в ООВ тільки однієї моди діаметр його серцевини обраний в межах 8–10 мкм, то для уніфікації діаметр оболонки ООВ обирається рівним 125 мкм, такий же, як і в багатомодових оптичних волокнах.

Дефекти захисного покриття оптичного волокна і його деформація під час виготовлення кабелю можуть спричинити утворення мікрозгинів, що призводить до додаткових втрат. Шляхом вибору відповідних кабельних матеріалів, конструкції та технології виготовлення кабелів коефіцієнт загасання, зумовлений мікрОВИГНАМИ у волокні, може бути зменшений до значення 0,1 дБ/км і менше.

1.3 Дисперсія сигналів в оптичних волокнах

Під час передачі імпульсів по оптичному волокну змінюється не лише їх амплітуда, але й форма – імпульси розширюються, збільшуючись за тривалістю, як це показано на рис. 1.3. Це явище називається дисперсією. Для прямокутних імпульсів збільшення тривалості, позначене як τ , визначається як

квадратична різниця між їх тривалістю на виході і вході $\tau = \sqrt{\tau_{вих}^2 - \tau_{вх}^2}$, де $\tau_{вих}$ і $\tau_{вх}$ – тривалості вихідного і вхідного оптичних імпульсів відповідно на рівні половини їх амплітуди (рис. 1.3). При цьому, чим довше оптичне волокно, тим більше проявляється дисперсія, і тому вводиться поняття коефіцієнта дисперсії, позначеного як D , нс/км.

Збільшення тривалості оптичних імпульсів при прийомі при заданій довжині оптичного волокна визначає граничну швидкість передачі сигналів по лінії зв'язку. При низьких значеннях згасання оптичного волокна даної лінії зв'язку для заданої швидкості передачі сигналів дисперсія обмежує максимальну відстань між регенераторами, тобто довжину оптичного волокна.

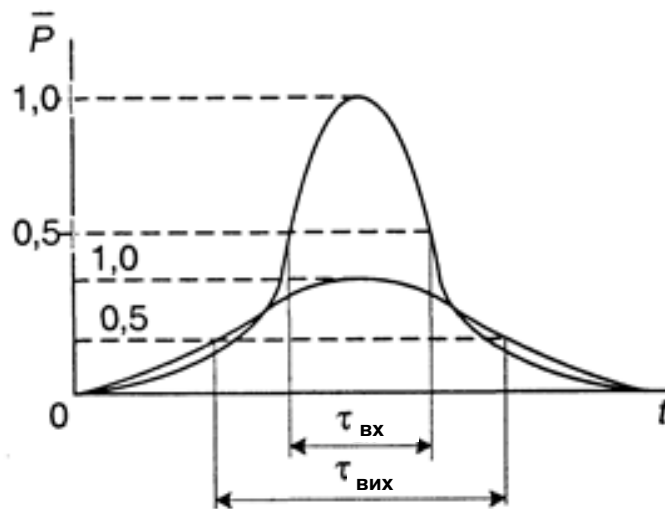


Рисунок 1.3 – Збільшення тривалості імпульсів та зменшення амплітуди при проходженні імпульсів по ОВ

Так, дисперсія та згасання вважаються основними параметрами передачі оптичних волокон. Давайте коротко розглянемо основні причини виникнення дисперсії. Загалом, дисперсію визначають три фактори:

- 1) відмінність фазових швидкостей передачі направляються мод, які поширюються серцевиною ОВ;
- 2) напрямні властивості структури ОВ;
- 3) властивості матеріалів, у тому числі виготовляються ОВ.

Звичайно, ми розрізняємо міжмодову дисперсію τ_{mm} , внутримодову (хвильоводну) дисперсію τ_{xm} і матеріальну дисперсію τ_{mat} , або дисперсію матеріалу оптичного волокна.

Відмінність у швидкостях поширення напрямних мод за фіксованої довжини хвилі випромінювання призводить до того, що час, необхідний для проходження цими модами оптичного волокна від його входу до виходу, є неоднаковим. Внаслідок цього тривалість імпульсу, що передається, збільшується. Це збільшення дорівнює різниці часу поширення найповільнішої та найшвидшої хвиль (мод). Зазначене явище називають міжмодовою дисперсією τ_{mm} .

Припустимо, що в оптичному волокні зі східчастим індексом заломлення промінь пройшов шлях зі зміщенням вправо. Відстань, що пройшов промінь по серцевині волокна зигзагоподібна, буде дорівнювати $L / \cos \theta_1$. Час, який промінь затратив на цей шлях, залежить від кута θ_1 і обчислюється за формулою (1.9), при умові якщо його швидкість руху дорівнює $v_1 = c/n_1$:

$$t(\theta_1) = Ln_1/c \cdot \cos \theta_1. \quad (1.9)$$

Отримана формула показує, що час поширення променів у оптичному волокні збільшується зі зростанням кута θ_1 , що викликає міжмодову дисперсію. При введенні оптичного випромінювання в волокно, коли кут θ_1 змінюється від 0 до θ_{1max} , час поширення по найкоротшому шляху, згідно з формулою (1.9), складатиме:

$$t_{max} = Ln_1/c \cdot \cos \theta_{1max} = Ln_1^2/c \cdot n_2; t_{min} = Ln_1/c. \quad (1.10)$$

Припустимо, що на вхід оптичного волокна подається дуже короткий оптичний імпульс ($\tau_i \rightarrow 0$). Початок вихідного імпульсу, що проходить крізь оптичне волокно заданої довжини L , збігається з моментом приходу першого оптичного променя, який пройшов найкоротший шлях, а кінець вихідного

імпульсу – з моментом приходу останнього променя, що пройшов найдовший шлях. Згідно з виразами (1.10), збільшення тривалості вихідного імпульсу через міжмодову дисперсію буде:

$$\tau_{\text{мм}} = t_{\text{max}} - t_{\text{min}} = Ln_1(n_1 - n_2)/cn_2. \quad (1.11)$$

Так як $(n_1 - n_2)/n_1 = \Delta$ – і врахувавши, що зазвичай $n_1/n_2 \sim 1$, для ступінчастого ОВ отримаємо:

$$\tau_{\text{мм}} = (n_1\Delta/c)L. \quad (1.12)$$

З формули (1.12) для міжмодової дисперсії можна висунути наступні висновки:

1. Збільшення тривалості передачі оптичних імпульсів через волокно, зумовлене міжмодовою дисперсією, зменшується зі зменшенням різниці показників заломлення серцевини і оболонки. Це пояснює те, чому в реальних ступінчастих оптичних волокнах стараються мінімізувати різницю $(n_1 - n_2)$.

2. Збільшення тривалості імпульсів на виході з волокна пропорційно його довжині L .

Проте це спостереження стосується лише ідеальних волокон, де відсутня взаємодія між модами. У реальних волокнах наявність неоднорідностей викликає взаємодію хвиль, що поширюються. Цей ефект стає помітним при певній довжині волокна, яку називають довжиною зв'язку між модами (L_y). Приблизно L_y складає 2...3 км, і вираз для міжмодової дисперсії можна переписати у вигляді:

$$\tau_{\text{мм}} = (n_1\Delta/c)\sqrt{LL_y}, \text{ де } L \geq L_y. \quad (1.13)$$

Внутримодова (хвильоводна) дисперсія $\tau_{\text{вм}}$ виникає через нелінійну залежність коефіцієнта фази β від довжини хвилі оптичного випромінювання λ для кожної спрямованої моди. Під час поширення спрямованих мод по оптичному волокну фазові швидкості $v_\phi = \omega/\beta$ змінюються, але залишаються в

межах $c/n_1 \leq v_\phi \leq c/n_2$. Ці зміни створюють різницю в часовій затримці між складовими оптичного сигналу, що призводить до збільшення тривалості вихідного оптичного імпульсу, утвореного прийнятими модами. Збільшення тривалості прийнятого імпульсу через внутримодову дисперсію пропорційно ширині спектра оптичного випромінювання $\Delta\lambda$ і виражається формулою:

$$\tau_{вм} = \Delta\lambda LB(\lambda), \quad (1.14)$$

де $B(\lambda)$ – коефіцієнт питомої внутримодової дисперсії, який прийнято виражати в пікосекундах, поділених на 1 км довжини ОВ і нанометри ширини спектра оптичного випромінювання.

Проведений короткий аналіз внутримодової дисперсії базується на припущенні, що показники заломлення серцевини та оболонки, n_1 та n_2 відповідно, не змінюються залежно від довжини хвилі оптичного випромінювання. У реальних умовах це уявлення не є точним. Зміна показників заломлення серцевини та оболонки від довжини хвилі оптичного випромінювання також впливає на фазові швидкості напрямних мод $v_\phi = c/\beta$ всередині спектра оптичного джерела. Різниця в часовій затримці між складовими прийнятого оптичного сигналу, що виникає внаслідок цього, є результатом матеріальної дисперсії. Збільшення тривалості оптичного імпульсу, зумовлене матеріальною дисперсією, визначається аналогічно попередньому виразом.

$$\tau_{mat} = \Delta\lambda LM(\lambda), \quad (1.15)$$

де $M(\lambda)$ – коефіцієнт питомої дисперсії матеріалу.

Внутримодову та матеріальну дисперсії називають хроматичною (частотною) дисперсією. Результуюче збільшення тривалості оптичного

імпульсу за рахунок міжмодової, внутримодової та матеріальної дисперсії на ОС довжиною L визначається за формулою:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{мм}}^2 + (\tau_{\text{вм}} + \tau_{\text{мат}})^2} . \quad (1.16)$$

Різні типи оптичних волокон мають відмінності у прояві дисперсії.

У ступінчастих оптичних волокон у режимі багато модів переважає міжмодова дисперсія, що виражається в великих значеннях коефіцієнта дисперсії ($D_{\text{мм}} = 20 \dots 50$ нс/км).

У градієнтних оптичних волокнах промені, які подорожують ближче до центральної осі волокна, пройдуть менший відстань, але в матеріалі з більшим показником заломлення, що означає меншу швидкість. Протилежно, периферійні промені, біля оболонки, подолають більший шлях, але в матеріалі з меншим показником заломлення, тобто з більшою швидкістю. Внаслідок цього час, потрібний для різних променів для подорожі через серцевину оптичного волокна, вирівнюється, і головною стає дисперсія матеріалу. Зі збільшенням довжини хвилі коефіцієнт дисперсії матеріалу зменшується, а в діапазоні довжин хвиль 1.1...1.6 мкм він знаходиться приблизно в межах 2...3 нс/км за абсолютною величиною.

У ступінчастих оптичних волокнах, коли використовується одномодовий режим роботи, міжмодова дисперсія відсутня, але спостерігаються внутримодова і матеріальна дисперсії. На рисунку 1.4 показано графіки залежності коефіцієнтів цих дисперсій від довжини хвилі оптичного випромінювання.

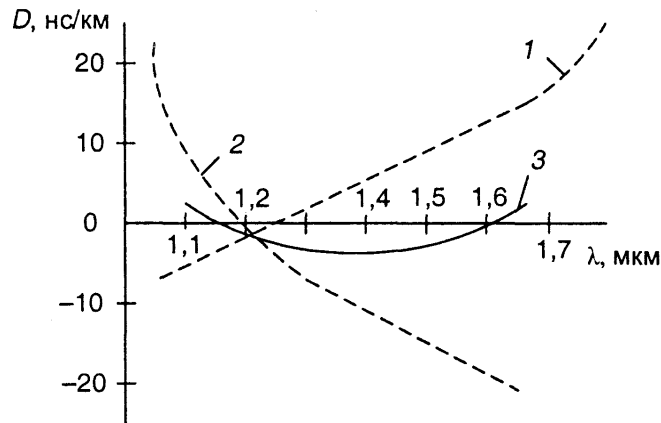


Рисунок 1.4 – Залежність коефіцієнтів дисперсій від довжини хвилі оптичного випромінювання

де крива 1 показує коефіцієнт внутримодової дисперсії, а крива 2 – коефіцієнт матеріальної дисперсії.

Зазначені коефіцієнти майже однакові за абсолютною величиною, але протилежні за фазою у широкому діапазоні довжин хвиль. Це призводить до їх взаємної компенсації, та результуючий коефіцієнт дисперсії (крива 3) при $\lambda = 1,1 \dots 1,7$ мкм залишається низьким, не перевищуючи $1 \dots 2$ нс/км [5], особливо в областях $\lambda = 1,3$ мкм та $\lambda = 1,55$ мкм, де оптичні волокна мають мінімальні значення коефіцієнта згасання (див. рис. 1.2).

Порівнюючи параметри дисперсії різних типів і різних режимів роботи оптичних волокон, можна зробити висновок, що найкращі характеристики мають оптичні волокна (див. рис. 1.5, а). Градієнтні волокна також демонструють хороші параметри дисперсії (див. рис. 1.5, б). Найвища дисперсія спостерігається у ступінчастих оптичних волокнах (див. рис. 1.5, в) [3].

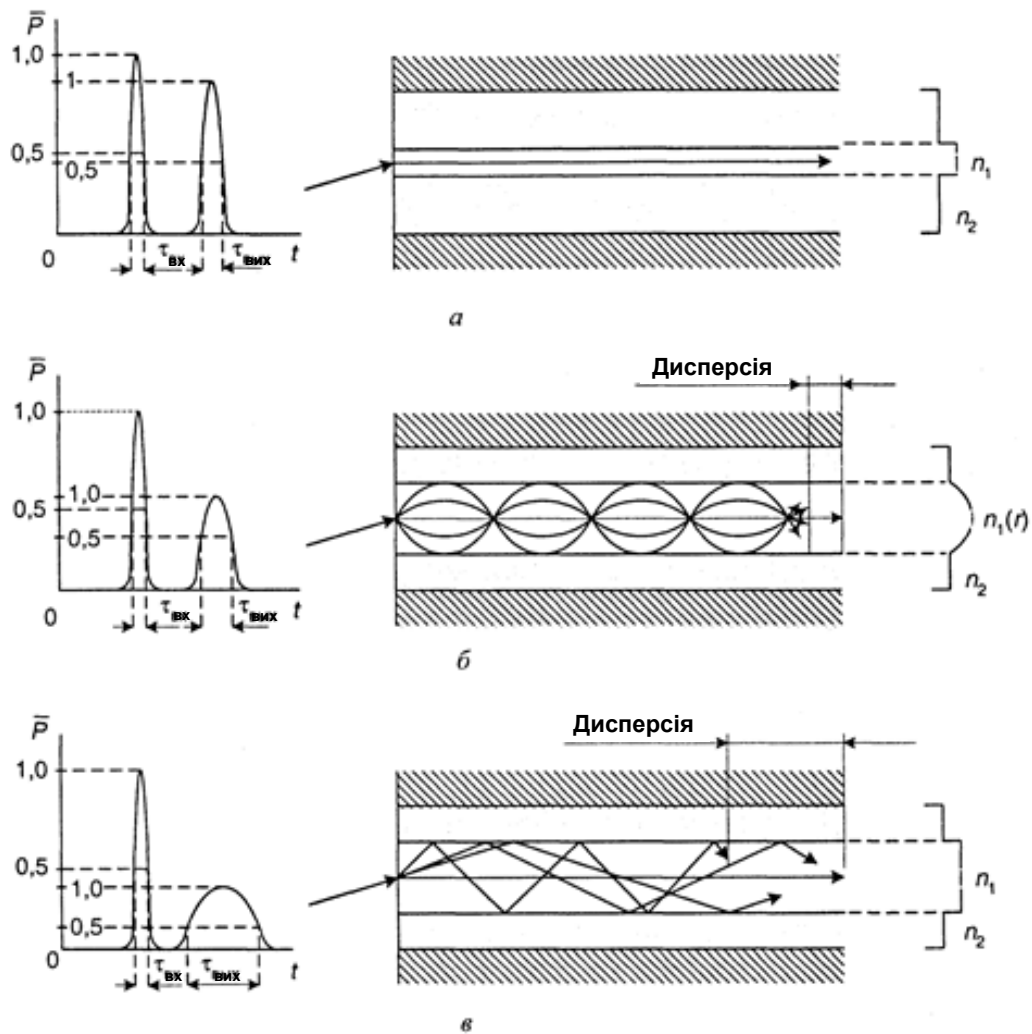


Рисунок 1.5 – Порівняння дисперсійних параметрів різних типів і різних режимів роботи ОВ

Дисперсійні властивості волоконно-оптичних ліній передачі також залежать від типу використовуваного джерела оптичного випромінювання (ОПД). При лазерних діодах, завдяки їх вузькій смузі випромінюваних частот, дисперсія оптичних волокон виявляється менш суттєво. Однак, у світловипромінюючих діодах смуга випромінювання значно ширша, що призводить до виражених дисперсійних ефектів в оптичних волокнах.

Дисперсія, позначена τ , і коефіцієнт дисперсії (D) безпосередньо пов'язані з такими параметрами різних типів оптичних волокон, як смуга пропускання та коефіцієнт широкосмуговості, відповідно.

Смуга пропускання (Δf) - це інтервал частот, де значення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) оптичного волокна перевищує або дорівнює половині її максимального значення. Це відповідає зниженню рівня оптичної потужності сигналу на межах (крайніх частотах) смуги пропускання оптичного волокна на 3 дБ.

Смуга пропускання розраховується за такою формулою [4, 5]: $\Delta f = 0,44/\tau$. Наприклад, якщо $\tau = 2$ нс, то $\Delta f = 220$ МГц.

Так, оптичні волокна всіх типів можна розглядати як фільтри зі зрізом частоти, де частота зрізу обернено пропорційна довжині волокна.

Співвідношення між смугою пропускання ОВ і довжиною ОС L км при $L \leq L_y$ виражається пропорцією $\Delta f/\Delta f_x = L_y/L$, де значення параметрів Δf і L з індексом x – шукані, а без нього – задані. Відповідно:

$$\Delta f_x = \Delta f L / L_y \text{ і } L_y = L \Delta f / \Delta f_x. \quad (1.17)$$

У довгих оптичних системах (приблизно понад 3 км), де вже встановився зв'язок між модами, спостерігається квадратична залежність між смугою пропускання (Δf) і довжиною волокна (L), що може бути виражено наступною формулою:

$$\Delta f/\Delta f_x = \sqrt{L_x/L} \text{ і тоді } \Delta f_x = \Delta f/\sqrt{L_y/L} \quad (1.18)$$

Так, збільшення довжини оптичного кабелю приводить до зменшення його пропускної здатності. Наприклад, якщо постачити споживачу кабель завдовжки 2 км з шириною смуги пропускання 5000 МГц, то для кабелю довжиною 98 км ця смуга зменшиться і становитиме лише близько 715 МГц.

Так, збільшення довжини волоконно-оптичних ліній передачі призводить до зниження ширини смуги частот оптичного сигналу, який передається, що в свою чергу обмежує пропускну здатність або інформаційну ємність такої лінії

передачі. Отже, розширення смуги частот оптичних сигналів, які передаються, різко обмежує довжину волоконно-оптичної лінії передачі.

Важливо враховувати, що пропускна здатність та довжина волоконно-оптичної лінії передачі обмежуються не лише дисперсією, а також загасанням сигналу у волокні.

Коефіцієнт широкосмугового (KF) визначається як смуга пропускання оптичного волокна довжиною 1 км (в МГц·км). Порівнюючи параметри різних типів оптичних волокон, слід зауважити, що найбільший коефіцієнт широкосмуговості мають одномодові оптичні волокна. Особливо помітні їх переваги на довгих хвилях 1,3 та 1,55 мкм, де міжмодова дисперсія відсутня, а коефіцієнти хроматичної дисперсії та згасання надзвичайно малі та мають тенденцію до зниження у міру вдосконалення технології виробництва. На зазначених довжинах хвиль коефіцієнт широкосмуговості, як правило, перевищує значення 50 ГГц·км. Це дозволяє використовувати одномодові оптичні волокна у високошвидкісних системах передачі даних великої протяжності.

Градентні оптичні волокна з параболічним та особливо з оптимальним профілем показника заломлення забезпечують можливість передачі широкої смуги частот, навіть при збільшенні діаметра серцевини до 50 мкм, що відповідає розміру типового ступінчастого оптичного волокна. Найкращі оптичні волокна з оптимальним профілем показника заломлення мають коефіцієнт широкосмуговості у діапазоні 3...5 ГГц·км.

Проте навіть маленьке відхилення профілю від оптимального призводить до різкого зменшення коефіцієнта широкосмуговості (KF), який обчислюється за формулою: $K_F = 0,44/D$. Наприклад, якщо $D = 1$ нс/км, то $K_F = 440$ МГц·км.

1.4 Висновки до розділу

Вивчені особливості передачі оптичних сигналів у волоконно-оптичних каналах зв'язку. Показано, що в оптичному волокні можуть поширюватися лише хвилі, довжина яких менша за діаметр серцевини.

Виявлено, що зі збільшенням діаметра серцевини зростає критична довжина хвилі і зменшується критична частота.

Оптичні волокна характеризуються частотою відсічення, вище якої вони функціонують як фільтри верхніх частот.

Виявлено, що втрати під час передачі оптичних сигналів зумовлені розсіюванням енергії в навколишній простір, заміною матеріалу волокна та поглинанням енергії сторонніми домішками.

Розглянуто причини виникнення дисперсії в оптичних волокнах. Встановлено, що збільшення довжини оптичного волокна приводить до зниження смуги пропускання, а отже і до зменшення пропускної здатності.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

2.1 Оцінювання диференціальної групової затримки оптичного сигналу

Під час проведення вимірювань диференціальної групової затримки (ДГЗ) сигналу в оптичному волокні використовували автоматизовану комп'ютерну систему зі спеціальним програмним забезпеченням, усі результати вимірювань записували у файл (сумарний розмір файла ~830 кБайт). На рис. 1.1-1.2 показано кольорову діаграму і густину розподілу імовірності, нормованої за середнім значенням ДГЗ.

Метод вимірювання ДГЗ – метод матриць Джонса [2, 3].

Одне вимірювання для однієї довжини хвилі λ триває ~ чотири секунди.

Максимальне вимірюване значення ДГЗ (для вимірювань з спектральним кроком ~ 0.3 нм) становить 40 пікосекунд.

Похибка вимірювань становить ~ 310 фс для спектрального кроку 0.3 нм.

Вимірювали ДГЗ на сегменті завдовжки 95 км стандартного одномодового оптичного волокна броньованого оптичного кабелю.

Ширина смуги вимірювань - 1510 - 1625 нм.

Спектральна роздільна здатність - 0.3 нм.

Період повторення вимірювань - кожних три години.

Результати вимірювань ДГЗ сигналу для сегмента оптичного волокна показано на кольоровій діаграмі, що демонструє зміну ДГЗ як у часі, так і залежно від довжини хвилі.

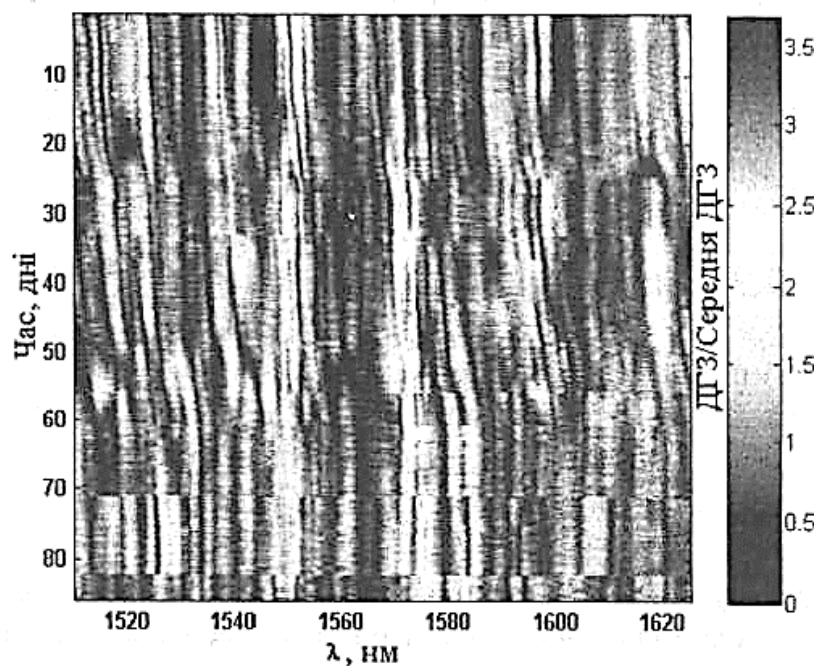


Рисунок 2.1 – Виміряне нормоване значення ДГЗ залежно від часу і довжини хвилі

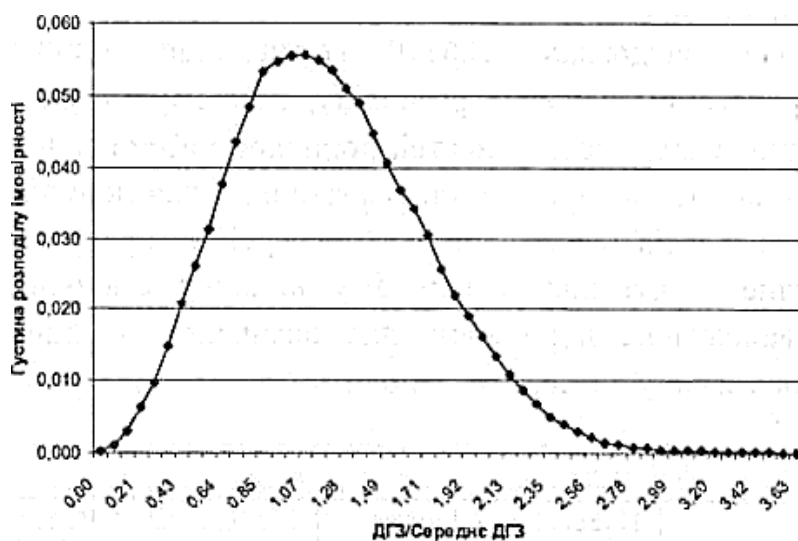


Рисунок 2.2 – Густина розподілу імовірності нормованого значення ДГЗ

На рис. 2.2 показано густину розподілу імовірності ДГЗ для вимірювань, виконаних протягом 90 днів у діапазоні довжин хвиль 1510-1625 нм. Діаграма побудована так: для всіх вимірювань у часі (720 вимірювань) і для всього спектрального діапазону визначено значення ДГЗ, далі обчислено середнє значення ДГЗ, усі результати нормовані за середнім значенням і зображені

однією кривою. По суті – це сумарний закон розподілу ДГЗ у широкому спектральному діапазоні (вимірювання для 340 різних спектральних складових).

Для підвищення точності розрахунків імовірності помилок, визначення імовірності перевищення ДГЗ максимально допустимого значення, прогнозування максимального значення ДГЗ сигналу потрібно за результатами експериментальних вимірювань ДГЗ визначити закон її розподілу [4, 5]

Враховуючи візуальну оцінку результатів (рис. 2.2), як приклад, для визначення емпіричного закону розподілу оберемо такі теоретичні розподіли: Пуассона, Гаусса, Максвелла, Релея.

Послідовність визначення закону розподілу. Кількість виміряних значень ДГЗ у спектральному діапазоні 1510-1625 нм становить 126170.

У середовищі MatLAB генеруються чотири послідовності випадкових чисел завдовжки 126170 кожна, що підпорядковуються вищеперерахованим законам розподілу, причому математичне очікування кожної з цих послідовностей дорівнює математичному очікуванню послідовності експериментальних даних, а для нормального закону розподілу дисперсія також дорівнює дисперсії виміряної послідовності. Математичне очікування в кожному випадку становить 20 пс, а середньоквадратичне відхилення для виміряної послідовності і для нормального закону розподілу становить 7,5.

Таблиця 2.1 – Значення математичного очікування

Розподіл	Пуассона	Гаусса	Максвелла	Релея	Експ.
Мат. очікування	19.977	20.005	19.998	19.993	19.993

Із кожної послідовності випадково робимо вибірку з певною кількістю елементів.

Для кожної вибірки діапазон усіх значень виміряної ДГЗ розбивають на 64 піддіапазони із кроком одна пікосекунда і для кожної послідовності

(виміряної і згенерованих) визначається кількість значень ДГЗ, що попадає у кожен із піддіапазонів.

Для одержаних розподілів ДГЗ кожної з вибірок і результатів експериментальних вимірювань за критерієм Колмогорова-Смірнова проводиться перевірка приналежності їх до одного закону розподілу.

Порівняння за критерієм Колмогорова-Смірнова

На рис. 2.3 показано теоретичні розподіли Пуассона, Гаусса, Максвелла, Релея і емпіричний розподіл результатів вимірювання ДГЗ у широкому спектральному діапазоні.

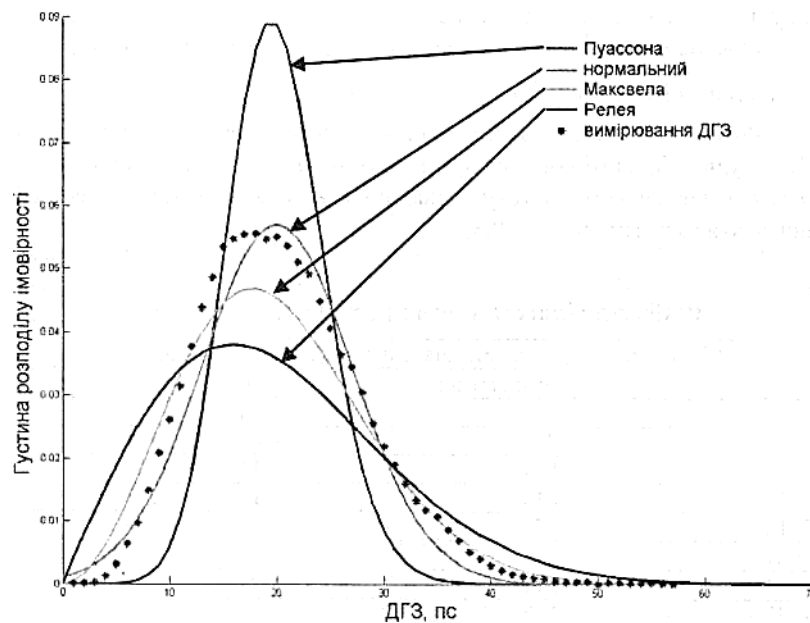


Рисунок 2.3 – Теоретичний і емпіричний розподіл ДГЗ

Під час візуального оцінювання можна зробити висновок, що розподіли Пуассона і Релея не підходять.

Враховуючи результати обчислень за вищевказаним критерієм, знайдемо величини G і X .

Таблиця 2.2 – Значення величин G і X

Розподіл	Пуассона	Гаусса	Максвелл	Релея
G	0,173	0,048	0,036	0,105
X	5,095	1,409	1,067	3,100
$p(\lambda)$	<0,001	0,040	0,192	<0,001

Як видно з результатів, умова $p(\lambda) > 0,05$ виконується тільки для закону розподілу Максвелла, також значення імовірності близьке до 0,05 для нормального закону розподілу.

Отже, з одержаних результатів порівняння за критерієм Колмогорова-Смірнова можна зробити висновок, що диференціальна групова затримка сигналу одномодового оптичного волокна найточніше описується розподілом Максвелла.

Порівняння нормального розподілу і результатів вимірювання ДГЗ за критерієм χ^2 Пірсона

Розіб'ємо діапазон значень нормованого по середньому значення ДГЗ результатів вимірювання і моделювання на 14 проміжків, тобто $r+1=14$ і визначимо частоту попадання в кожен з цих інтервалів (результати записано в табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Розбиття гіпотетичного простору на 14 частин

Значення ДГЗ сигналу	Кількість значень у заданому	
	Вимірювання	Нормальний
0+6	18	34
6+9	76	60
9+12	160	114
12+15	246	186
15+18	278	253
18+21	275	283
21+24	244	271
24+27	187	209
27+30	131	138
30+33	81	76
33+36	54	34
36+39	26	13
39+42	11	4
>42	7	1

Користуючись формулою розподілу χ^2 Пірсона, знаходимо $\chi_{\text{емп}}^2, r + 1 = 14, df = 13, \alpha = 0,05, n = 1676$.

Отже, $\chi_{\text{емп}}^2 = 77,69$.

Користуючись таблицею «Квантилі статистики χ^2 », знаходимо $\chi_{кр}^2 = 22,36$.

Умова $\chi_{емп}^2 < \chi_{кр}^2$ виконується, отже, робимо висновок, що гіпотеза H_0 про приналежність обох послідовностей до одного закону розподілу відкидається, отже, розподіл ДГЗ результатів вимірювання не належить до нормального закону розподілу.

Отже, порівнюючи результати вимірювання ДГЗ і результати теоретичних розподілів, встановили, що із вищеперерахованих чотирьох для описування розподілу диференціальної групової затримки найкраще підходить розподіл Максвелла.

2.2 Моделювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів

Як відомо, поляризаційно-модова дисперсія – це середньо-квадратичне значення диференціальної групової затримки, яка, своєю чергою, виникає внаслідок анізотропії профілю показника заломлення серцевини оптичного волокна і різних швидкостей поширення поляризаційних складових світла. Для реалізації моделі потрібно спочатку вибрати метод зображення та обчислення параметрів поляризованого світлового випромінювання [5].

Вибраний метод розрахунку повинен давати змогу визначати такі величини: інтенсивність хвилі в будь-якій точці середовища поширення, амплітуду і абсолютну фазу кожної з поляризаційних складових, а також наочно зображати стан поляризованого чи частково-поляризованого світла. Із всієї різноманітності відомих методів найбільшої уваги, з погляду поширення світла в оптичному волокні заслуговує метод Джонса. Згідно з цим методом, поляризаційні властивості середовища представляються за допомогою матриці Джонса, а випромінювання - за допомогою вектора.

Вектор Джонса будь-якого стану еліптичної поляризації світла в точці z простору має вигляд

$$E(z, t) = \begin{bmatrix} \overline{E}_x \cos(\omega t - 2\pi z/\lambda + \delta_x) \\ \overline{E}_y \cos(\omega t - 2\pi z/\lambda + \delta_y) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

де $\overline{E}_x, \overline{E}_y$ – амплітуди;

δ_x, δ_y – фази;

x- та y – поляризаційних складових відповідно.

Оскільки компоненти поля у всіх точках z простору змінюються однаково, то часову залежність можна упустити і

$$E(z) = \begin{bmatrix} \overline{E}_x e^{j\delta_x} \\ \overline{E}_y e^{j\delta_y} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Метод Джонса забезпечує простий спосіб математичних обчислень, пов'язаних з поляризованим оптичним випромінюванням. На рис. 8.4 показана схема оптичної системи, падаюча хвиля і одна з вихідних модифікованих хвиль.

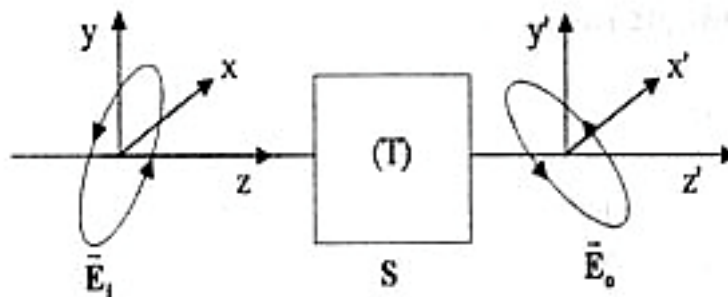


Рисунок 2.4 – Падаюча і вихідна хвилі на оптичній системі S

Вихідний вектор:

$$\begin{bmatrix} E_{0x^1} \\ E_{0x^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

чи в скороченій формі

$$E_o = T E_i \quad (2.4)$$

де $T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}$ - матриця Джонса оптичної системи.

У разі поширення світла через анізотропне середовище, як показано на рис. 2.5, $E(z)$ і $E(z+\Delta z)$ являють собою вектори Джонса хвилі в двох поперечних площинах, що перетинають вісь z у точках z і $z+\Delta z$. Зміна стану хвилі в результаті її поширення на відстань Δz між z і $z+\Delta z$ описується співвідношенням

$$E(z + \Delta z) = M(z, \Delta z)E(z), \quad (2.5)$$

де $M(z, \Delta z)$ – матриця Джонса для тонкого (безмежно тонкого) шару анізотропного середовища завтовшки Δz , що має координату z і безмежні плоскі грані, паралельні площині xy .

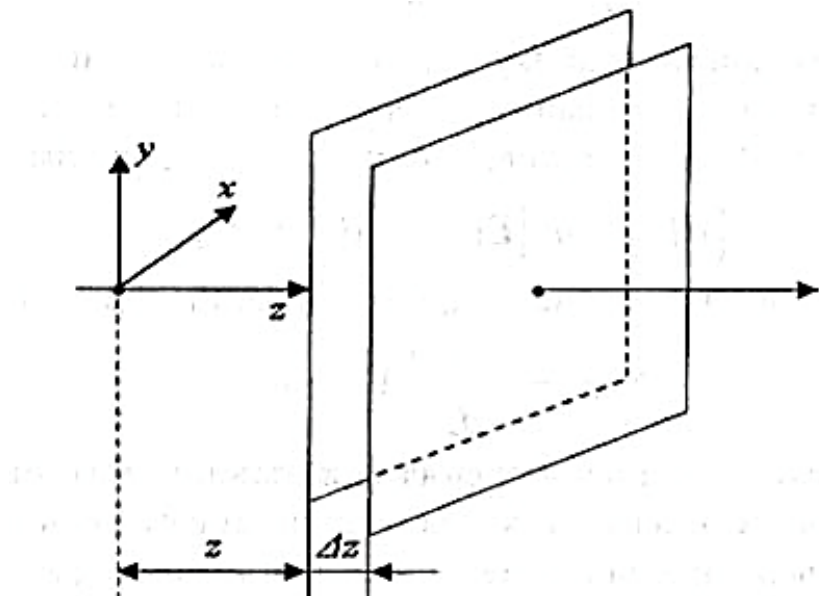


Рисунок 2.5 – Поширення світла через анізотропне середовище вздовж осі z у системі координат xyz

Зміна вектора Джонса між площинами z і $z + \Delta z$:

$$E(z + \Delta z) - E(z) = [M(z, \Delta z) - \mathcal{I}] E(z), \quad (2.6)$$

де $\mathfrak{I}$ - одинична 2×2 матриця. Розділивши обидві частини рівняння (2.6) на Δz , і перейшовши до границі $\Delta z \rightarrow 0$, одержимо диференціальне рівняння поширення для вектора Джонса E :

$$dE(z)/dz = N(z)E(z) \quad (2.7)$$

де

$$N(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{M(z, \Delta z) - \mathfrak{I}}{\Delta z} \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.8) визначає 2×2 матрицю $N(z)$ - диференціальну матрицю поширення Джонса (описує зміну величини електричного вектора плоскої світлової хвилі у разі переміщення її фронту на нескінченно малу відстань dz вздовж напрямку поширення), яка характеризує анізотропні оптичні властивості середовища в площині, перпендикулярній напрямку поширення пучка і пересікаючи її в точці z .

Вектор Джонса $E(z)$ світлової хвилі, що пройшла відстань z оптичного пристрою у вигляді товстого (не безмежно малого) шару анізотропного середовища, визначається виразом

$$E(z) = T(z)E(0), \quad (2.9)$$

де $E(0)$ – вхідний вектор Джонса (при $z=0$), а $T(z)$ – повна матриця Джонса, що характеризує ділянку середовища завтовшки z , обмежену двома поперечними площинами, що перетинають пучок у точках 0 і z . Диференціюючи (2.9) по z і прирівнюючи до (2.7), одержимо

$$[dT(z)/dz]E(0) = N(z)E(z), \quad (2.10)$$

звідки, провівши низку нескладних операцій, одержуємо

$$N(z) = \frac{dT(z)}{dz} T^{-1}(z). \quad (2.11)$$

Отже, одержали співвідношення між повного матрицею Джонса $T(z)$ для оптичного елемента у вигляді шару анізотропного матеріалу завтовшки z і диференціальною матрицею поширення Джонса $N(z)$, що описує оптичні властивості матеріалу цього шару.

Модель оптичного волокна з заданою середньою ДГЗ $\langle \Delta t \rangle$ полягає в каскадуванні N двозаломлювальних пластинок різної товщини, кожна з яких вносить випадковий зсув фаз між ортогональними поляризаційними складовими δ_i з їх випадковою орієнтацією швидкої і повільної осей, що задається азимутом пластинки θ_i . Кожна з пластинок описується комплексними матрицями Джонса розміром 2×2 :

$$M_i(\delta) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\frac{i\delta_i}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-\frac{i\delta_i}{2}} \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

де перша матриця – матриця повороту, вводить обертання вектора вхідного випромінювання в систему відліку основних станів поляризації двозаломлювальної пластинки, друга матриця вводить затримку двох ортогональних поляризованих складових.

Результуюча матриця Джонса усього оптичного волокна з N сегментів T – це добуток матриць Джонса кожної індивідуальної пластинки:

$$T = \prod_{i=0}^{N-1} M_i(\delta) \quad (2.13)$$

Згідно з методом Джонса (2.3) можна визначити тільки вектор Джонса вихідного випромінювання, яке пройшло через послідовність двозаломлювальних пластин, що певним чином модифікували вхідний вектор.

Запропонований у цьому прикладі підхід для визначення часу затримки, що вноситься пластинкою, ґрунтується на визначенні різниці фаз між двома ортогональними складовими і далі переведення цього значення в часову затримку. Відомо, що двозаломлювальна пластинка, яка характеризується

відносним зсувом фаз, може вносити різну затримку між поляризаційними складовими, залежно від кута між вхідним вектором Джонса і азимутом осі найбільшої швидкості, ця затримка може лежати в межах від нуля до максимальної затримки пластинки. Метод Джонса дає точний результат, коли результуюча зміна фази вихідного вектора щодо вхідного не перевищує 2π . Якщо ж відносна зміна фази між двома поляризаційними складовими є більшою, ніж 2π , тобто $(2\pi * n + \delta, n=1,2, \dots)$, то результуюча різниця фаз між поляризаційними складовими все одно буде δ , тому, застосовуючи цей метод, неможливо визначити відносну різницю фаз між складовими, враховуючи тільки результуючий вихідний вектор Джонса. Один з таких сегментів ОВ показано на рис. 2.6, а. Позначення, які використано на цьому рисунку, такі: E – електричний вектор вхідного випромінювання; θ , ϕ – швидка і повільна осі сегмента ОВ відповідно.

Для вирішення цієї проблеми оптичне волокно розбивають на сегменти з затримкою менше ніж $2\pi/\omega$, і ДГЗ кожного з цих сегментів визначають окремо (рис. 2.6, б).

Матриця Джонса кожного з сегментів, враховуючи азимут і зсув фаз, має вигляд

$$M_i(\omega) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_i + e^{-i\delta_i} \sin^2 \theta_i & (1 - e^{-i\delta_i}) \cos \theta_i \sin \theta_i \\ (1 - e^{-i\delta_i}) \cos \theta_i \sin \theta_i & \sin^2 \theta_i + e^{-i\delta_i} \cos^2 \theta_i \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

де $\delta_i = \Delta\tau_i * \omega$, $\Delta\tau_i$ – максимальна часова затримка пластинки;

ω - кутова частота випромінювання.

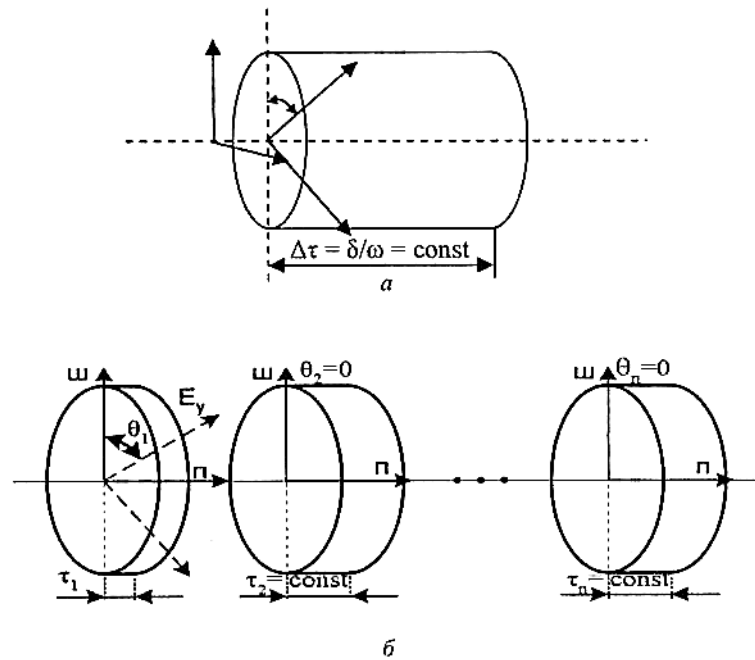


Рисунок 2.6 – Модель ПМД сегмента оптичного волокна

Часова затримка сегмента ОВ – це зсув фаз між ортогональними поляризаційними складовими, поділений на кутову частоту. Якщо змінюється довжина хвилі (кутова частота), то змінюватиметься і зсув фаз між основними станами поляризації, оскільки часова затримка є постійною величиною. Такий перехід дає змогу в моделювання ввести додатковий параметр - кутову частоту, тобто враховувати довжину хвилі оптичного випромінювання.

Сумарна диференціальна групова затримка сигналу оптичного волокна з N сегментів у такому разі дорівнює сумі ДГЗ кожного з сегментів, враховуючи знак (тобто часова різниця між вертикальною і горизонтальною поляризаційними складовими):

$$dgd_{\Sigma} = \sum_{k=1}^N dgd_k \quad (2.15)$$

2.3 Висновки до розділу

Проведено дослідження закону розподілу густини імовірності нормованого значення диференціальної групової затримки оптичних сигналів.

Проведено порівняння отриманого закону розподілу густини імовірності ДГЗ з нормальним розподілом з використанням критеріїв Пірсона.

Показано, що сумарна диференціальна групова затримка оптичного сигналу у оптичному волокні із N сегментів дорівнює сумі ДГЗ кожного сегменту.

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ ОЦІНЮВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ГРУПОВОЇ ЗАТРИМКИ

3.1 Розробка алгоритму оцінювання диференціальної групової затримки

Значення азимута кожного сегмента оптичного волокна і часової затримки, яку вносить сегмент, є випадковими величинами, причому розподіл значень азимута є рівномірним у межах $[-\pi; \pi]$, розподіл часової затримки є розподілом Максвелла.

Блок-схему алгоритму моделювання показано на рис. 3.1.

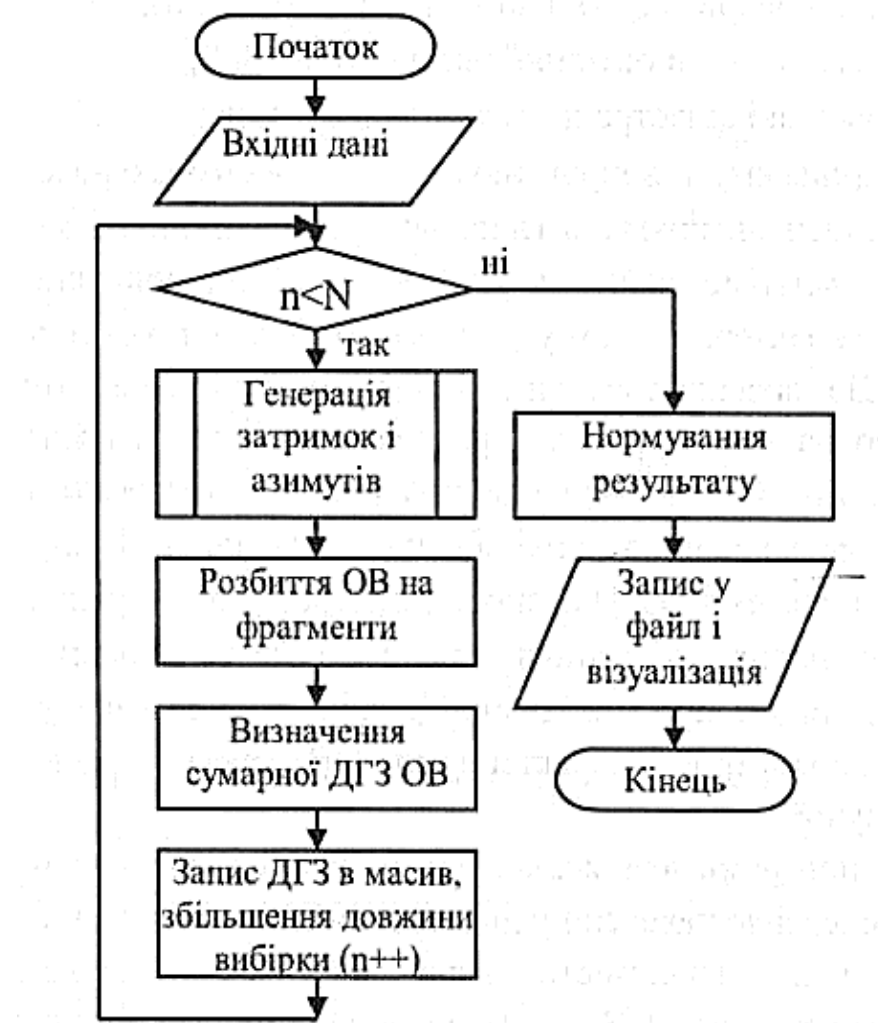


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму моделювання ПМД

Генерується оптичне волокно із заданої кількості сегментів N з випадковими значеннями азимутів і часів затримки. Далі це волокно перераховується у фрагменти, відносний зсув фаз кожного з яких не перевищує 2π . Вхідний вектор Джонса оптичного випромінювання – однаковий для всіх випадків ОВ. Далі вхідний вектор по чергово перемножується з матрицею Джонса кожного з фрагментів. Результуюче значення ДГЗ для цього зразка ОВ записується в масив. Наступний крок – генерація наступного волокна із N сегментів. Алгоритм повторюється задану кількість разів, у нашому випадку було взято 10^5 зразків ОВ для кожного моделювання. Одержаний масив значень ДГЗ для 10^5 волокон зображається графічно.

Результатом моделювання для кожного випадку оптичного волокна є значення поляризаційної модової дисперсії (середнє значення модуля диференціальної групової затримки).

Створена модель дає змогу досліджувати залежність диференціальної групової затримки від таких параметрів:

- еліпс поляризації вхідного сигналу (рис. 2.8);
- довжина хвилі оптичної несучої (рис. 2.9);
- довжина і анізотропія оптичного волокна;
- ширина смуги випромінювання оптичного джерела.

Результати вимірювань (див. попередній пункт) і моделювання свідчать, що миттєве значення ДГЗ залежно від довжини хвилі має випадковий характер, причому для різних довжин хвилі істотно відрізняється. Це пояснюється тим, що багатосегментна структура оптичного волокна з анізотропією профілю показника заломлення серцевини по різному модифікує еліпс поляризації світлового випромінювання з різною довжиною хвилі. Різниця значень ДГЗ сигналу різних довжин хвилі системи DWDM спостерігається для ОВ різної довжини і кількості сегментів, з різною кількістю спектральних каналів і спектральною відстанню між ними. Це свідчить про високу чутливість ДГЗ як до параметрів і характеристик ОВ, так і до довжини хвилі оптичної несучої.

3.2 Розробка програми та аналіз результатів досліджень диференціальної групової затримки оптичних сигналів

Текст програми для моделі оптичного волокна з поляризаційно-модовою дисперсією наведено у додатку, лістинг `zatrimka.m`.

Оцінювали адекватність розробленої моделі, порівнюючи результати вимірювання ДГЗ на транспортній мережі і результати моделювання, зокрема порівнювали математичне очікування нормованого значення ДГЗ, дисперсію ДГЗ і відповідність результатів моделювання і вимірювання одному закону розподілу за критерієм χ^2 (Пірсона).

Діапазон значень нормованого по середньому значення ДГЗ результатів вимірювання і моделювання розбито на 9 проміжків, тобто $r+1=9$ (табл. 3.1), число ступенів свободи $d.f=r=8$, вибраний рівень значущості $\alpha=0,1$, величина вибірки $n=370$.

Застосувавши таблицю “Квантилі статистики χ^2 ”, знаходимо $\chi_{кр}^2=13,36$.

Таблиця 3.1 – Розбиття гіпотетичного простору на 9 частин

Нормоване значення ДГЗ сигналу	Кількість значень у заданому діапазоні	
	Вимірювання	Моделювання
0,00 - 0,27	41	35
0,27 - 0,55	50	44
0,55 - 0,82	58	58
0,82-1,09	71	76
1,09-1,37	57	78
1,37-1,64	42-	31
1,64-1,91	30	27
1,91-2,18	11	11
>2,18	10	10

Умова $\chi_{емп}^2 < \chi_{кр}^2$ виконується, отже, обидві послідовності належать до одного закону розподілу.

Значення ДГЗ сигналу ОВ залежить від еліпса поляризації вхідного випромінювання, що показано на рис. 3.2, де по осі абсцис відкладено

орієнтацію електричного вектора вхідного сигналу відносно вертикалі, а по осі ординат – значення ДГЗ сигналу на виході з оптичного волокна.

У даному пункті також проведено дослідження залежності ДГЗ від довжини хвилі оптичної несучої.

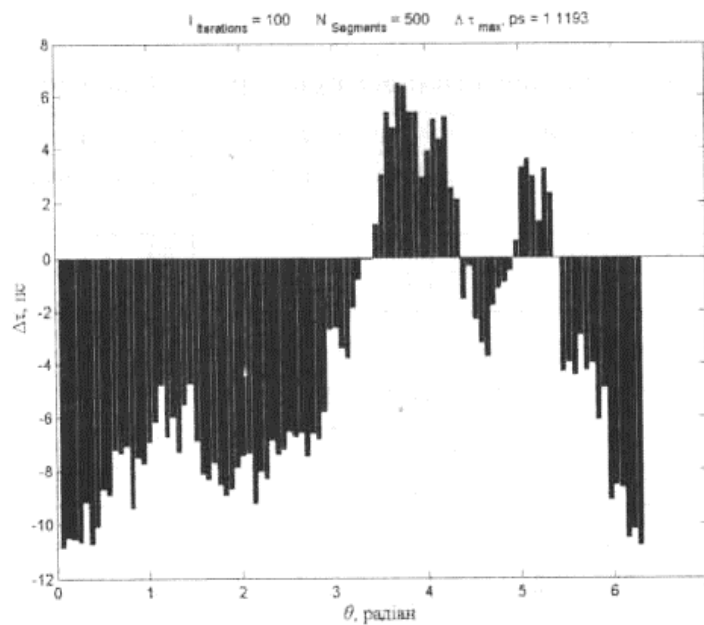
Значення вихідних даних для моделювання:

$k=40$ - кількість довжин хвиль DWDM-системи;

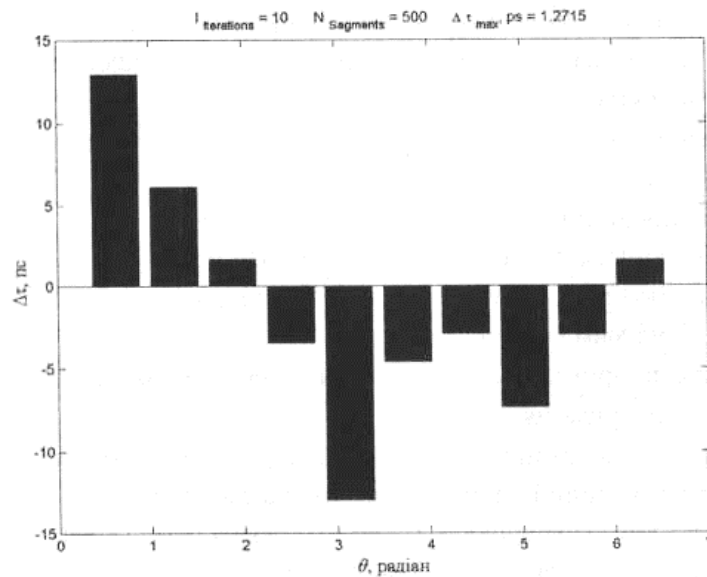
$\lambda_0=1,56061$ мкм – початкова довжина хвилі;

$\lambda_1= 1,5295$ мкм - кінцева довжина хвилі.

Вхідне випромінювання однакове для всіх 40 каналів – лінійна вертикальна поляризація.



а - для 100 вхідних сигналів



б – для 10 вхідних сигналів

Рисунок 3.2 – Залежність ДГЗ від вектора вхідного випромінювання

Графічну залежність диференціальної групової затримки від довжини хвилі оптичної несучої показано на рис. 3.3.

Результати моделювання, як і результати вимірювання на реальному волокні, показують залежність значення ДГЗ від довжини хвилі для певного конкретного зразка оптичного волокна. Значення ДГЗ є чутливим навіть до незначних змін двозаломлювальних характеристик сегментів волокна.

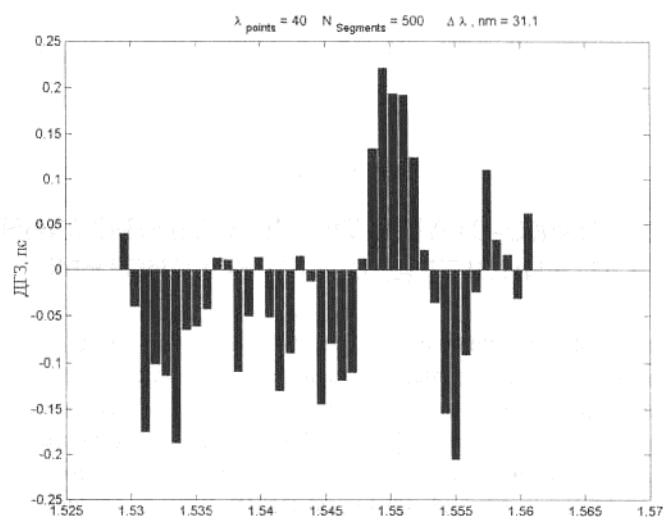


Рисунок 3.3 – Диференціальна групова затримка для 40 довжин хвиль (кількість сегментів $N=100$)

Отже, в цьому пункті розглянуто моделювання оптичного волокна з поляризаційною модовою дисперсією, показано метод оцінювання адекватності моделі і наведено короткий аналіз результатів моделювання.

%% Моделюючий алгоритм для рівномірного і Пуассонівського розподілів

while (A>0)

n=n+1; % Лічильник довжини вибірки

% Генерація векторів – часів роботи кожного з вузлів системи

tau=50*(1+rand(7,1));

% Обчислення значення часу роботи усієї системи

T1= min(tau(4,1), tau(6,1));

t2= min(max(tau(2,1), tau(3,1)), tau(5,1));

g = min([tau(1,1), max(t1,t2), tau(7,1)]);

S1=S1+g; % Сума для МО

S2=S2+g*g; % Сума для дисперсії

Mg=S1/n; % Вибіркове математичне очікування

Dg=S2/n-Mg^2; % Вибіркова дисперсія

vg=(Dg^.5)/Mg; % Вибірковий коефіцієнт варіації

if vg <= v % Якщо досягнуто потрібної точності

A=A-1; % то після A ітерацій - вихід з циклу

end

end

%% Виведення результату

fprintf ('Mg=%f; Dg=%f; n=%d; vg=%f;\n',Mg, Dg, n, vg);

toc;

Лістинг zatrimka.m

% Статистичне моделювання оптичного волокна (ОВ) з диференціальною груповою

% затримкою (ДГЗ)

function dgd=zatrimka(iter, NNN, max_delay)

%% Вхідні фактори

% **iter** – необхідна кількість значень ДГЗ (довжина вибірки)

% **NNN** - кількість двозаломлюючих сегментів оптичного волокна

% **max_delay** - максимальна затримка сегмента оптичного волокна

format long; % Задання формату чисел

%% Внутрішні фактори

c=3e8; %швидкість світла у вакуумі

lambda=1.55*1e-6; %довжина хвилі

f=c/lambda; %частота оптичного сигналу

w=2*pi*f; %кутова частота

dgd=[]; %Масив результатів моделювання

h = waitbar (0,'Searching, ...'); %ПрогресБАР

%% Генерація значень ДГЗ

for jn = 1:iter %цикл по ітераціях

suma = 0;

Vx=[1;0]; %Вхідний вектор (поляризований сигнал) на вході ОВ

nn=1; %Початкове значення (к-сть малих фрагм. ОВ)

tau_vf=Maxwel_a(max_delay, NNN); %випадкове задання затримок
фрагментів (розподіл Максвелла)

tau__max=1/f; %Максимальна затримка, що не перевищує 2π

%% Перерахунок всього ОВ в малі фрагменти (затримка кожного $< 2\pi$)

for k=1 : NNN % Цикл по сегментах ОВ

tau__all=tau_yf (k,1) ; % Значення затримки фрагмента волокна, більше ніж
 2π

n_t=tau__all/tau_max; % Кількість фрагментів і затримка останнього

фрагмента

```
n_fr=floor(n_t); % Кількість цілих фрагментів
```

```
d_t= (n_t-n_fr) *tau_max; % Дробова (залишкова) частина фрагмента
```

```
ro(nn,1)=(rand-0.5)*2*pi; % Значення азимута першого фрагмента
```

(випадкове)

```
tau (nn, 1)=d__t; % Затримка першого малого фрагмента (еквівалент 2*pi)
```

```
nn=nn+1; % Наступний фрагмент
```

```
for tt=2 : (n_fr+1) % Цикл для ініціалізації всіх решти фрагментів
```

```
ro(nn,1)=0; % Всі інші азимуту в межах великого фрагмента рівні нулю
```

```
tau(nn,1)=tau_max; % Всі інші затримки еквівалентні 2*pi
```

```
nn=nn+1; % Наступний фрагмент
```

```
end
```

```
end
```

%% Визначення сумарної ДГЗ волокна

```
N=nn-1; % Загальна кількість елементарних фрагментів ОВ
```

```
for k = 1 : N % Цикл по фрагментах для одного волокна
```

```
delta=w*tau(k,1);
```

```
C1=cos(ro(k,1));
```

```
S1=sin(ro(k,1));
```

```
J(1,1)= (C1^2)+(S1^2)*exp(-1i*delta); % Матриця Джонса фрагмента ОВ
```

```
J(1,2)= (1-exp(-1i*delta))*C1*S1;
```

```
J(2,1)= (1-exp(-1i*delta))*C1*S1;
```

```
J(2,2)= (S1^2)+(C1^2)*exp(-1i*delta);
```

```
Vyx=J*Vx; % Вектор на виході фрагмента волокна,
```

```
faza=angle(Vyx); % Вихідна фаза кожної складової
```

```
dk=faza(1,1)-faza(2,1); % Вихідна різниця фаз між ортогональними складовими
```

(поляризаційними)

suma=suma+dk; % Сумарна ДГЗ сегмента волокна (накопичення результату)

Vx=Vyx; % Вихідний вектор попереднього фрагмента є вхідним для наступного

end

dgd=[dgd; suma] ; % Запис результатів ітерації в масив

waitbar (jn/iter);

end

close (h);

%% Обробка результатів

dgd=le12*dgd/w; % Перетворення ДГЗ з радіан в пікосекунди

dgd=abs(dgd); % Переведення ДГЗ тільки в додатню область (знак визначав різницю часів поширення ортогональних складових)

dgd=dgd/(mean(dgd)); % Нормування по середньому значенню

%% Візуалізація результатів моделювання

N_k=50; % Кількість діапазонів ДГЗ (кроків гістограми)

R=max(dgd); % Максимальне значення ДГЗ (діапазон значень від 0 до **R**)

step=R/N_k; % Крок (розмір діапазону) гістограми

x=0:step:R; % Розбиття на діапазони (по осі абсцис)

z1=[]; % Густина розподілу імовірності (ГРІ) ДГЗ

for k1=0:step:R % Визначення ГРІ ДГЗ

z1=[z1; abs(sum(dgd(:,1)>=k1 & dgd(:,1)<k1+step)/iter)];

end

%% Побудова гістограми

F=figure;

bar(0:step:R,z1);

title([* I_I_t_e_r_a_t_i_o_n_s= ' num2str(iter),' N

__S_e_g_m_e_n_t_s = ' , num2str (NNN) ,. . .

```

' \Delta \tau _m_a_x, ps = ', num2str (1+12*max (tau_vf)) ] ) ;
xlabel('\Delta \tau / mean(\Delta \tau));
ylabel('Normalized frequency');
text(-R, max(z1), ['<DGD ^2>^1/^2 = ', num2str(mean(abs(dgd)))],...
'VerticalAlignment', 'top', 'HorizontalAlignment', 'left');

%% Формування таблиці статистичних параметрів вибірки
result(1,1) «iter; % Кількість ітерацій
result(2,1) =NNN; % Кількість великих сегментів волокна
result(3,1) =N; % Кількість малих фрагментів волокна
result(4,1) «max(tau_vf); % Максимальна затримка сегмента, с
result(5,1) =max(dgd); % Максимальне значення ДГЗ, пс
result(6,1) =min(dgd); % Мінімальне значення ДГЗ, пс
result(7,1) «mean(dgd); % Середнє значення ДГЗ, пс
result(8,1) «(std(dgd,l)) ^2; % Дисперсія ДГЗ
result(10,1)«sum(tau); % Сумарна затримка ОВ, с

%% Запис робочого простору і гістограми у файл
Str1=num2str(NNN);
str2=num2str(max_delay);
str3=strcat('NNN=',str1,';mt=',str2,'.mat');
save(str3);
str4=strcat('NNN=',str1, ';mt=',str2, '.tif');
saveas(ffig,str4);
return;

```

3.3 Висновки до розділу

Розроблено модель та блок-схему алгоритму моделювання поляризаційно-модової дисперсії. Створена модель дає змогу досліджувати залежність ДГЗ від довжини хвилі оптичного сигналу, від ширини сигналу

випромінювання джерела оптичних сигналів, довжини та анізотропії оптичного волокна.

Показано, що миттєве значення ДГЗ в залежності від довжини хвилі має випадковий характер і для різних хвиль суттєво відрізняється.

Досліджено залежність ДГЗ від вектора вхідного випромінювання для 10 вхідних сигналів і ця залежність також має випадковий характер.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Загальна декларація прав людини гарантує кожному право на справедливі та сприятливі умови праці, які відповідають вимогам безпеки та гігієни. В Україні це право визнане одним з конституційних прав, а його забезпечення здійснюється через систему правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та медичних заходів.

Електронно-обчислювальні машини призначені для зменшення ручної праці та полегшення розумового напруження. Вони дозволяють швидко вирішувати різноманітні завдання і обробляти інформацію на високих швидкостях. Така можливість виконувати операції на комп'ютерах укорочує час обробки інформації та розрахунків, що неможливо досягти іншими засобами обчислювальної техніки. Однак впровадження комп'ютерів у виробництво потребує дослідження умов праці з метою зниження ризику виникнення професійних захворювань та травм.

Під час розробки програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів на працівника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; пряма і відбита блискість; підвищення яскравість; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Під робочим місцем розробника програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів мається на увазі зона його трудової діяльності, оснащення необхідними засобами праці.

Загальною вимогою раціональної організації робочих місць є створення працівникам максимальної зручності для здійснення їх діяльності, вивільнення від нераціональних переміщень та рухів, зниження на цій основі витрат праці на виконувану роботу. Економія часу і сил працівника - головні критерії раціональності організації робочих місць.

Робоче місце і взаємне розташування усіх її елементів має відповідати антропометричним, фізичним і неординарним психологічним вимогам [10]. Важливе значення має також характеру роботи. Зокрема, з організацією робочого місця проектувальника мають бути дотримані такі основні умови:

- оптимальне розміщення устаткування, що до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні руху, і переміщення;
- необхідне природне, і штучне висвітлення до виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму, який не перевищує допустимого значення;
- достатня вентиляція робочого місця;

Головними елементами робочого місця розробника є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи організується відповідно до вимог [11].

Необхідно передбачити при проектуванні можливість різного розміщення документів: збоку від ПК, між монітором і клавіатурою і т.п. Крім того, у випадках, коли ПК має низьку якість зображення, наприклад, помітні миготіння, відстань від очей до екрана роблять більшою (близько 700 мм), ніж

відстань від ока до документа (300...450 мм). В загальному випадку, при високій якості зображення на ПК відстань від очей користувача до екрана, документа і клавіатури може бути рівним.

Велике значення надається характеристикам робочого крісла [12]. При проектуванні крісла виходять з того, що при будь-якому робочому положенні дослідника його поза повинна бути фізіологічно правильно обґрунтованою, тобто положення частин тіла повинно бути оптимальним. Для задоволення вимог фізіології, що впливають з аналізу положення тіла людини в положенні сидючи, конструкція робочого сидіння повинна відповідати таким основним вимогам:

- допускати можливість зміни положення тіла, тобто забезпечити вільне переміщення корпусу і кінцівок тіла один щодо одного;
- допускати регулювання висоти в залежності від росту працюючої людини (в межах від 400 до 550 мм);
- мати злегка увігнуту поверхню, мати невеликий нахил, тому поверхню сидіння рекомендується робити м'якою, передній край закругленим, а кут нахилу спинки робочого крісла - регульованим.

Приміщення, де здійснювалася робота за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки (сухе, мало заповишене, з нормальною температурою повітря, ізолюваними підлогами і малим числом заземлених приладів) [13, 14].

На робочому місці з усього обладнання металевим є лише корпус системного блоку комп'ютера, в якого крім робочої ізоляції передбачений елемент для заземлення та провід з заземлюючий жилою для приєднання до джерела живлення.

Електротехнічне устаткування: апаратури, кабелі й керівництва, розподільні пристрої всіх видів і напруг по своїх номінальних параметрах задовольняє умовам роботи як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах, перевантаженнях.

Для забезпечення безпеки установлюються наступні технічні рішення:

- Забезпечено недоступність струмопровідних частин (застосована схована проводка, кабель прокладений у спеціальних ринвах).
- Забезпечено ізолювання струмопровідних частин з використанням ізоляції, опір якої не нижче 1кОм/В, передбачені постійний контроль і профілактика ізоляції.
- Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

У випадку виникнення аварійної ситуації працівник зобов'язаний:

- у всіх випадках виявлення пошкодження проводів електричного живлення, несправності заземлення та інших пошкодженнях електрообладнання, виникненні запаху гарі, диму - негайно вимкнути електричне живлення і повідомити про аварійну ситуацію свого безпосереднього керівника й чергового електрика;
- при попаданні людини під електричну напругу негайно звільнити її від дії струму шляхом вимкнення електричного живлення, до прибуття лікаря надати потерпілому долікарську медичну допомогу;
- при будь-яких випадках порушень роботи технічного обладнання або програмного забезпечення негайно викликати представника технічної служби з питань експлуатації обчислювальної техніки;
- у випадку виникнення різі в очах, різкого погіршення зору, виникнення головного болю, больових відчуттів у пальцях та кистях рук, посилення серцебиття – негайно припинити роботу з використанням ПК, повідомити про те, що сталося, свого безпосереднього керівника й звернутися до медичної установи;
- при загорянні обладнання негайно відключити його від електромережі;
- про загорання повідомити свого безпосереднього керівника, оперативного чергового, пожежну службу; ужити заходів щодо ліквідації вогню за допомогою вуглекислотного або порошкового вогнегасника.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Робота, яка виконується розробником, згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [15]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.4.1 (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [16]).

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено система опалення, система кондиціонування та систематичне вологе прибирання.

Вимірювання параметрів мікроклімату проводиться на робочому місці і в робочій зоні на початку, в середині та в кінці робочої зміни. Вимірювання здійснюються не менше 2-х разів на рік (теплий та холодний періоди року) у порядку поточного санітарного нагляду, а також при прийманні до експлуатації нового технологічного устаткування, внесенні технічних змін в конструкцію діючого устаткування, організації нових робочих місць тощо.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці застосовується безліч речовин, які можуть потрапляти в повітря і становити небезпеку здоров'ю людей. Для визначення небезпечності досліджується вплив цих речовин на організм людини і встановлюють безпечні для людини концентрації та дози, які можуть потрапити різними шляхами в організм людини.

Для створення здорових і безпечних умов праці потрібно мати гігієнічне нормування шкідливих речовин, надійні способи визначення їх концентрацій у повітрі і сучасне технічне та організаційне забезпечення їх знешкодження.

В приміщенні, де здійснюється розробка програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Середньо добова	Клас небезпечності
	Максимально разова		
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

4.2.3 Виробниче освітлення

Серед чинників зовнішнього середовища, що впливають на організм людини в процесі праці, світло посідає одне з перших місць. Адже відомо, що майже 90 % усієї інформації про довкілля людина одержує через органи зору. Підчас здійснення будь-якої трудової діяльності втомлюваність очей, в основному, залежить від напруженості процесів, що супроводжують зорове сприйняття. До таких процесів належать адаптація, акомодация та конвергенція.

Світло впливає не лише на функцію органів зору, а й на діяльність організму в цілому. У разі поганого освітлення людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 4.4 (відповідно ДБН В.2.5-28-2018 [17]):

Таблиця 4.4 – Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.

2) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

4.2.4 Виробничий шум

Для робочих місць в приміщеннях із ПК характерна наявність механічних шумів (виникають внаслідок коливання деталей машин та їхнім взаємним переміщенням), аеродинамічних шумів (виникають в пружних конструкціях у газі або рідині) та шумів електричних машин.

Деякі ПК є потенційними джерелами цілого ряду звукових коливань як чутного, так і ультразвукового діапазону. Найчастіше рівні акустичного випромінювання, що виходить від ПК, охоплюють діапазон частот від 6,3 до 40 кГц.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [17]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Під час розробки програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів існує ризик виникнення підвищеного рівня електромагнітного поля. Несприятливу дію на організм людини мають електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, джерелами яких є телевізійні і радіомовні станції, пристрої стільникового радіозв'язку, апарати високочастотного нагрівання і навіть побутова апаратура.

Електромагнітні поля чинять термічний і морфологічний вплив на організм людини, викликаючи в ньому функціональні зміни.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	20кВ / м
для дорослих користувачів	
для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	15кВ / м

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання (MPR-II, TCO-92, TCO-99, TCO-03), а також дотримувати регламентовані режими праці і відпочинку.

4.3 Пожежна безпека

Метою пожежної безпеки об'єкта є попередження виникнення пожежі на визначеному чинними нормативами рівні, а у випадку виникнення пожежі – обмеження її розповсюдження, своєчасне виявлення, гасіння пожежі, захист людей і матеріальних цінностей.

В приміщенні, де здійснювалося розробка програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д».

За вогнестійкістю приміщення відноситься до другої категорії [18]. Робоча зона розробника відноситься до класу вибухонебезпечності В-IIа, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Система попередження пожежі – це комплекс організаційних заходів та технічних засобів, спрямованих на усунення умов виникнення пожежі.

У дослідженому приміщенні є відповідальний за пожежну безпеку працівник. Меблі та обладнання розміщені таким чином, щоб забезпечувався вільний евакуаційний прохід до дверей виходу з приміщення. Евакуаційні шляхи та виходи постійно утримуються вільними.

Документи, папір та інші горючі матеріали зберігаються на відстані не менше 1 м від електрощитів, електрозборок і електрокабелів, 0,5 м від світильників та 0,25 м від приладів опалення. Засоби протипожежного захисту (пожежні крани, пожежна та охороно - пожежна сигналізація, первинні засоби пожежегасіння тощо), які є у приміщенні утримуються у справному стані.

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні такі:

– несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників,

пересихання електроізоляційних матеріалів);

- використання електропобутових пристроїв (електрочайники, обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;

Для запобігання виникнення пожежі здійснюються такі заходи:

- щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;

- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту;

- своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів, а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї

У приміщені на випадок виникнення пожежі для обмеження її розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу ОУ-5, що відповідає нормам. Підходи до засобів первинного пожежогасіння та відключення електросхем устаткування вільні.

З метою дотримання протипожежного захисту забороняється:

- влаштовувати тимчасові електромережі, застосовувати саморобні плавкі вставки в запобіжниках, прокладати електричні проводи безпосередньо по горючій основі, експлуатувати світильники зі знятими ковпаками (розсіювачами), використовувати саморобні подовжувачі, які не відповідають вимогам Правил улаштування електроустановок;

- пристосовувати вимикачі, штепсельні розетки для підвішування одягу та інших предметів, обгортати електролампи й світильники, заклеювати ділянки електропроводки горючою тканиною, папером;

- використовувати побутові електрокип'ятильники, чайники і таке інше (окрім приміщень, спеціально відведених та обладнаних для цього), залишати

без нагляду увімкненими в електромережу кондиціонери, комп'ютери, лічильні та друкарські машинки тощо;

– захищати підступи до засобів пожежегасіння, використовувати пожежні крани, рукави й пожежний інвентар не за призначенням, зберігати документи, різні матеріали, предмети та інвентар у шафах (нішах) інженерних комунікацій;

– палити (окрім спеціально відведених для цього адміністрацією місць, позначених написом «Місце для паління» та забезпечених урною чи попільницею з негорючого матеріалу), проводити зварювальні та інші вогневі роботи без оформлення відповідального дозволу, застосовувати легкозаймисті рідини.

4.4 Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

ВИСНОВКИ

Вивчені особливості передачі оптичних сигналів у волоконно-оптичних каналах зв'язку. Показано, що в оптичному волокні можуть поширюватися лише хвилі, довжина яких менша за діаметр серцевини.

Виявлено, що зі збільшенням діаметра серцевини зростає критична довжина хвилі і зменшується критична частота.

Оптичні волокна характеризуються частотою відсічення, вище якої вони функціонують як фільтри верхніх частот.

Виявлено, що втрати під час передачі оптичних сигналів зумовлені розсіюванням енергії в навколишній простір, заміною матеріалу волокна та поглинанням енергії сторонніми домішками.

Розглянуто причини виникнення дисперсії в оптичних волокнах. Встановлено, що збільшення довжини оптичного волокна приводить до зниження смуги пропускання, а отже і до зменшення пропускнуої здатності.

Проведено дослідження закону розподілу густини імовірності нормованого значення диференціальної групової затримки оптичних сигналів.

Проведено порівняння отриманого закону розподілу густини імовірності ДГЗ з нормальним розподілом з використанням критеріїв Пірсона.

Показано, що сумарна диференціальна групова затримка оптичного сигналу у оптичному волокні із N сегментів дорівнює сумі ДГЗ кожного сегменту.

Розроблено модель та блок-схему алгоритму моделювання поляризаційно-модової дисперсії. Створена модель дає змогу досліджувати залежність ДГЗ від довжини хвилі оптичного сигналу, від ширини сигналу випромінювання джерела оптичних сигналів, довжини та анізотропії оптичного волокна.

Показано, що миттєве значення ДГЗ в залежності від довжини хвилі має випадковий характер і для різних хвиль суттєво відрізняється.

Досліджено залежність ДГЗ від вектора вхідного випромінювання для 10 вхідних сигналів і ця залежність також має випадковий характер.

У роботі також наведено основні заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Климаш М.М., Лаврів О.А., Бак Р.І., Оптичні та радіоканали телекомунікацій. Львів, 2019. – 424 с.
2. Чернихівський Є.М., Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 272 с.
3. Розорінов Г.М., Соловйов Д.О., Яковенко Л.В. Мережі передавання даних: напрямні системи оптичного зв'язку. - Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 128 с.
4. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. Г.М. Розорінов, Д.О. Соловйов - К.: Кафедра, 2019. – 410 ст.
5. Мохунь І.І., Вікторовська Ю.Ю., Галушко Ю.К. Оптичні технології в інформаційній техніці. – Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2021. – 301 с.
6. О.В. Онищук і К. О. Коваль, «Аналіз загасання у волоконно-оптичній лінії зв'язку», Опт-ел. інф-енерг. техн., вип. 28, 2014. - 129–133 с.
7. Ільченко М. Ю. Телекомунікаційні системи: монографія / М. Ю. Ільченко, С. О. Кравчук ; НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, Науково-дослід. ін-т телекомунікацій. – Київ : Наукова думка, 2017. – 735 с.
8. Телекомунікаційні системи передачі : підручник / В. М. Кичак, ТЗІ О. М. Шинкарук, Г. Г. Бортник, І. І. Чесановський, О. В. Стальченко. – Хмельницький : Видавництво НАДГІСУ, 2016. – 424 с.
9. Каток В. Б., Руденко І. Е., Однорог П. М. Волоконно-оптичні лінії зв'язку : навч. посібник для інж.-техн. прац. і студ. - Київ, 2016. 445 с.
10. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (
11. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

12. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. – Мінбуд України. – К.: 2006

13. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

14. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

15. ДСанПіН 3.3.6-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z0203-03>

16. НПАОП 0.00-7.11-12. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>.

17. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

18. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

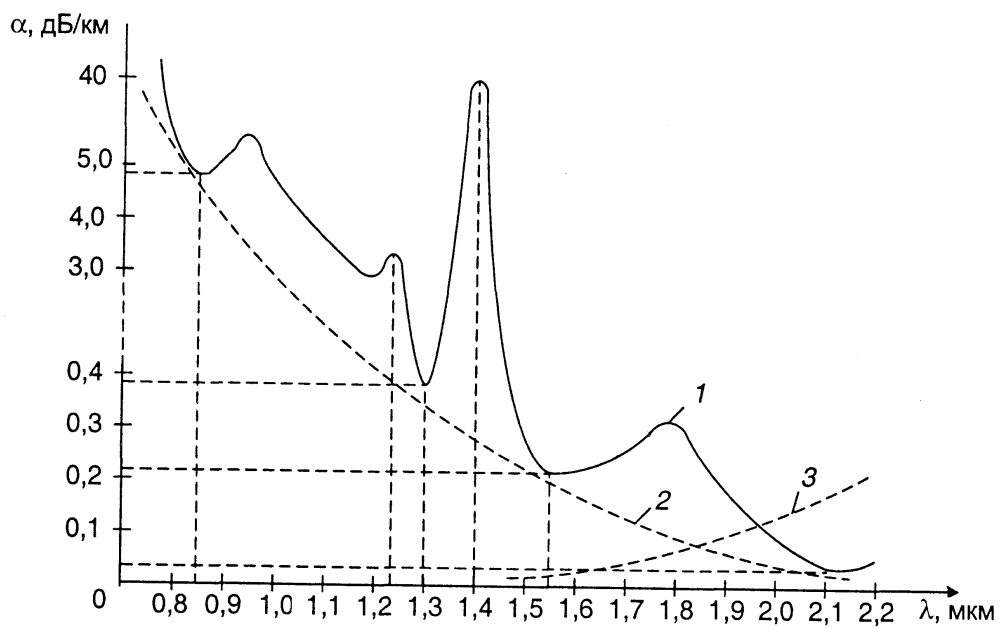
19. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

Додаток А
(обов'язковий)

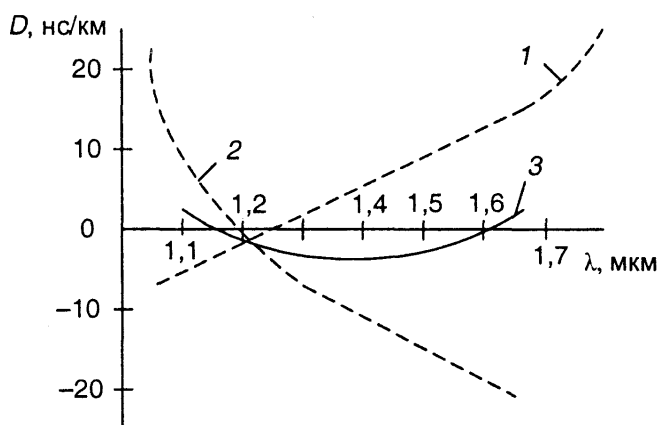
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

Розробка програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних
сигналів

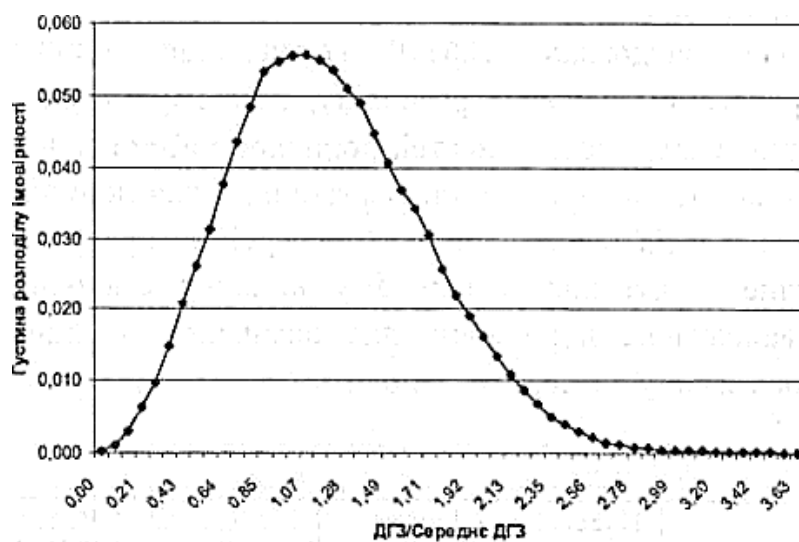
назва бакалаврської дипломної роботи



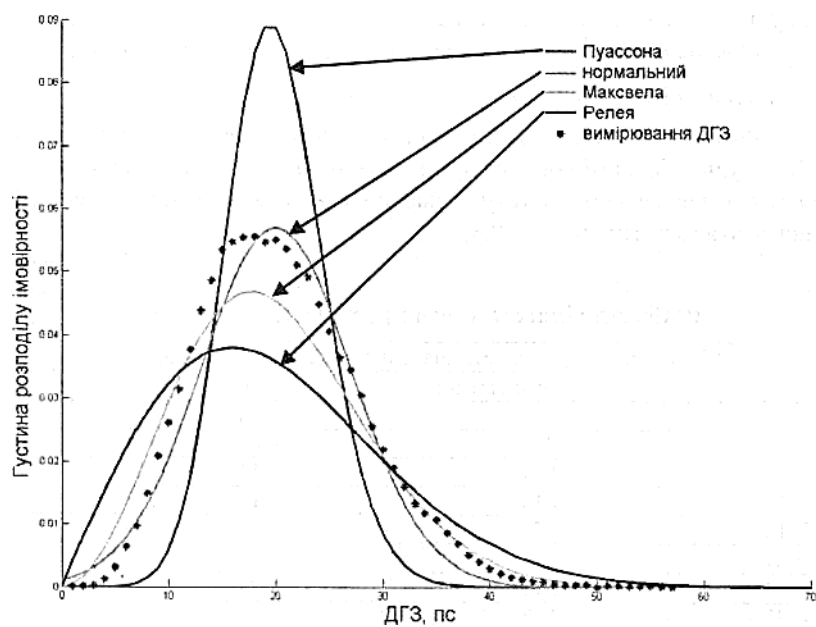
Експериментальна залежність коефіцієнта загасання власних втрат α_c від довжини хвилі переданого оптичного сигналу λ в ООВ з германосилікатного скла



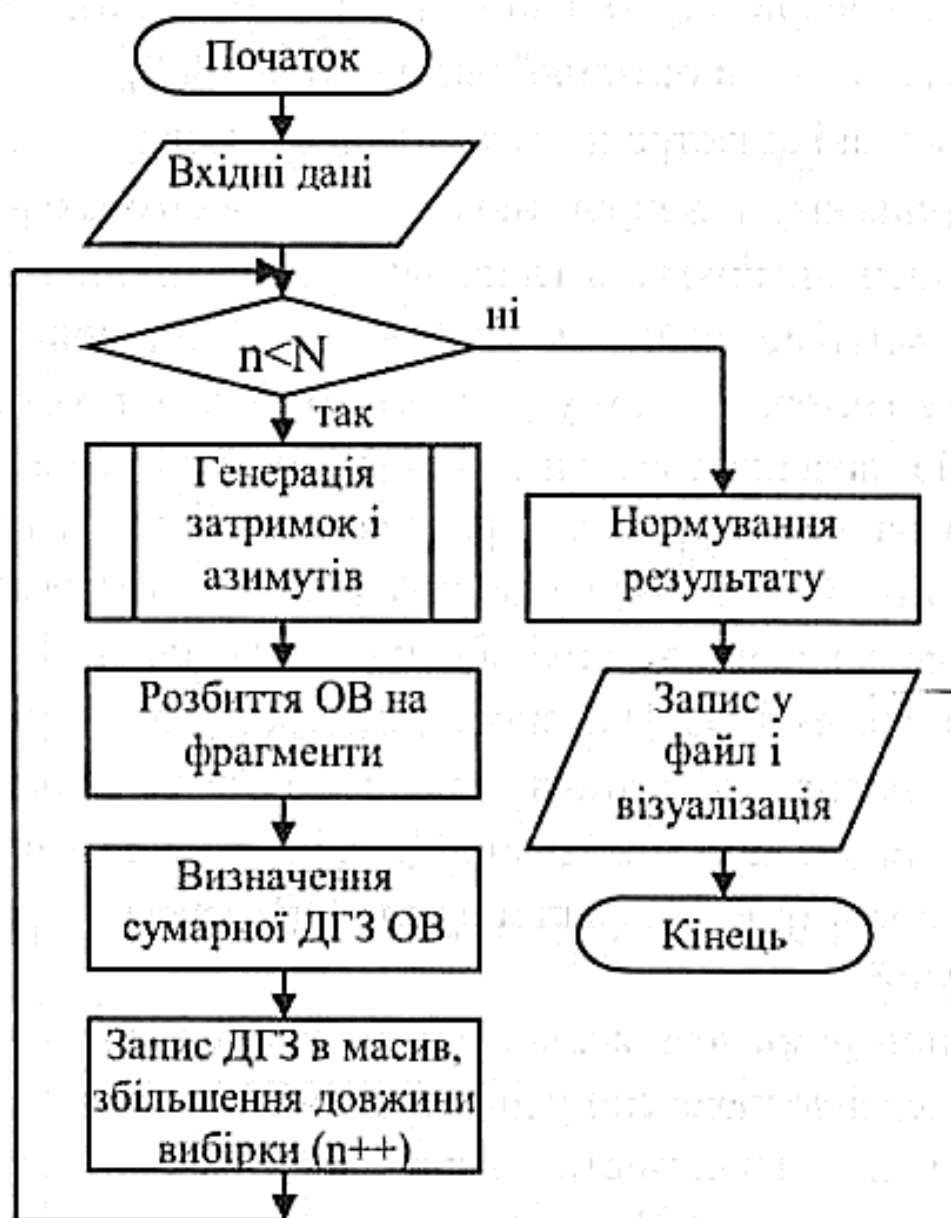
Залежність коефіцієнтів дисперсій від довжини хвилі оптичного випромінювання



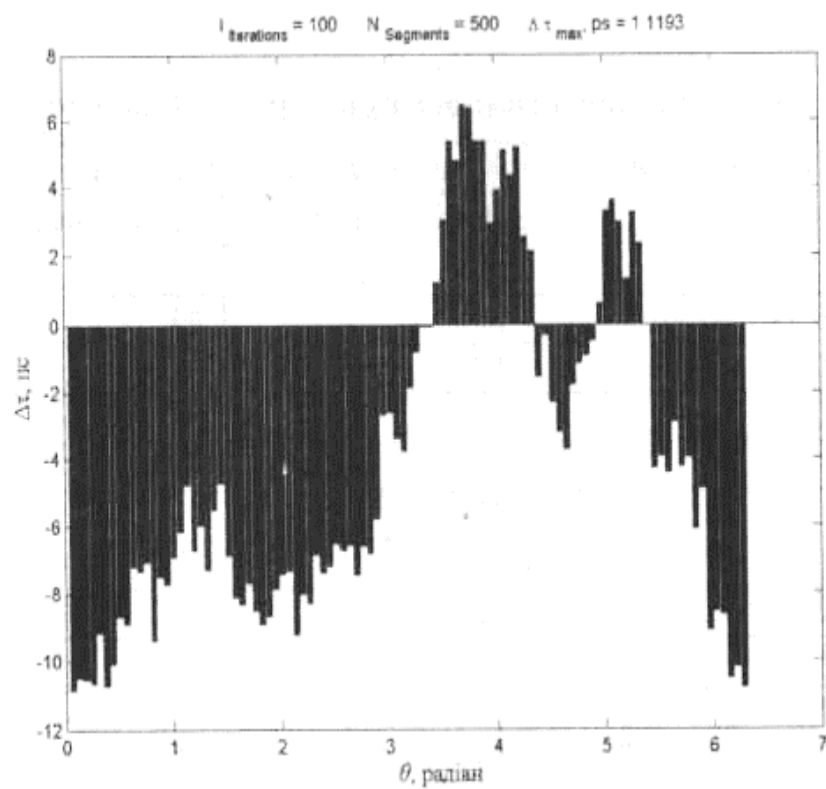
Густина розподілу імовірності нормованого значення ДГЗ



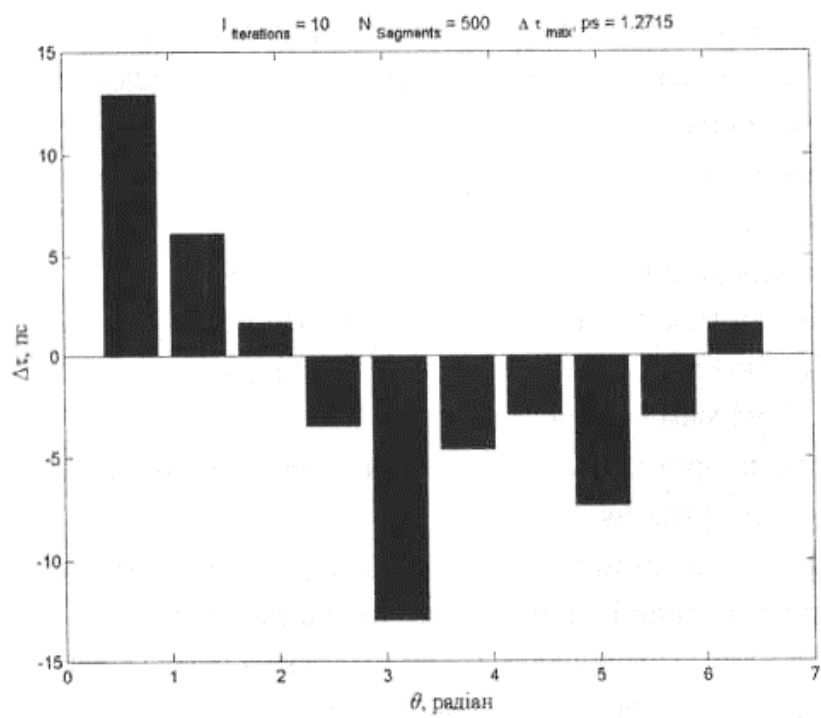
Теоретичний і емпіричний розподіл ДГЗ



Блок-схема алгоритму моделювання ПМД

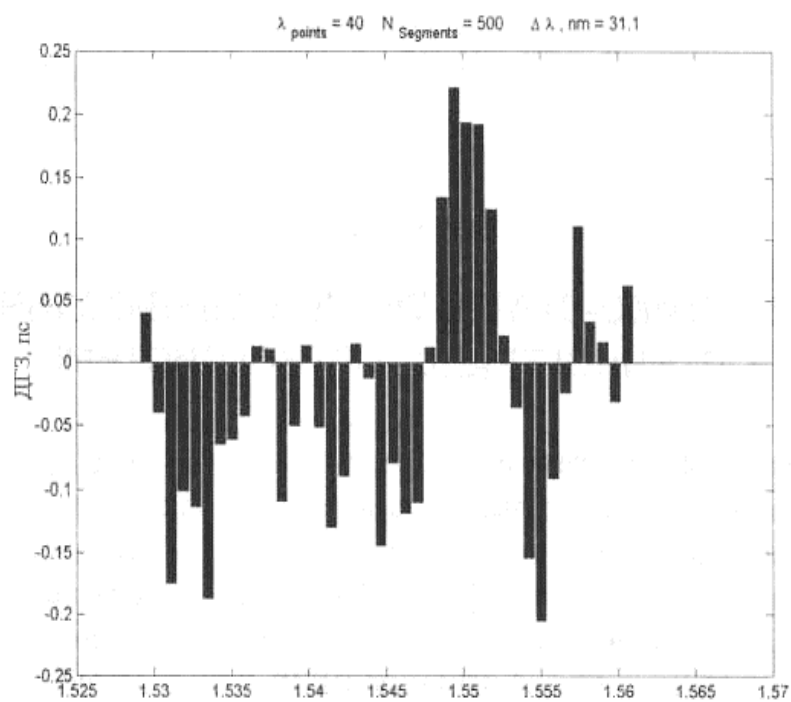


а - для 100 вхідних сигналів



б – для 10 вхідних сигналів

Залежність ДГЗ від вектора вхідного випромінювання



Диференціальна групова затримка для 40 довжин хвиль (кількість сегментів $N=100$)

Додаток Б

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Розробка програми оцінювання диференціальної групової затримки оптичних сигналів

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет Інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 88,6 % Схожість 11,4%

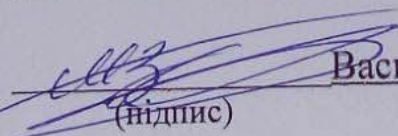
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

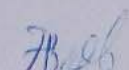
☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку

 Васильківський М.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

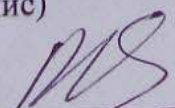
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Превор І.А.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Кичак В.М.
(прізвище, ініціали)