

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет**  
(повне найменування вищого навчального закладу)

**Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій**  
(повне найменування факультету)

**Кафедра електроніки та телекомунікацій**  
(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»  
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ЯКОСТІ ПЕРЕДАЧІ  
СИГНАЛІВ У ОПТОВОЛОКОННИХ СИСТЕМАХ**

**RESEARCH AND ANALYSIS OF SIGNAL  
TRANSMISSION QUALITY IN FIBRE OPTIC SYSTEMS**

спеціальність 172 Електронні комунікації та  
радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка»  
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ЕКРМ-21  
Денисюк Костянтин Олегович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент  
Лишук Віктор Васильович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Селепина Йосип Романович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій  
Кафедра електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти: магістр  
Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
Спеціальність: 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
Освітня програма: «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Денисюку Костянтину Олеговичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Дослідження та аналіз якості передачі сигналів у оптоволоконних системах*

Керівник роботи к.т.н., доцент *Лишук Віктор Васильович*

затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» січня 2025 р. №20/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 05.12. 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: *теорія передачі сигналів у ВОСП, тип оптоволокна, вимірювання у ВОСП.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

*Вступ*

*Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми кваліфікаційної роботи магістра*

*Розділ 2 Теоретична частина*

*Розділ 3 Практична частина*

*Розділ 4 Спеціальна частина*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

*13 слайдів презентації Power Point*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		<u>10,11%</u>	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «03» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми роботи магістра</i>	до 18.10.2025	
2	<i>Розділ 2 Теоретична частина</i>	до 25.10.2025	
3	<i>Розділ 3 Практична частина</i>	до 1.11.2025	
4	<i>Розділ 4 Спеціальна частина</i>	до 8.11.2025	
5	<i>Висновки</i>	до 15.11.2025 р.	
6	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 22.11.2025 р.	
7	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 29.11.2025 р.	
8	<i>Нормоконтроль</i>	до 01.12.2025 р.	
9	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 05.12.2025 р.	
10	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	до 30.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_ Денисюк К. О.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Лишук В. В.  
(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Денисюк К. О. Дослідження та аналіз якості передачі сигналів у оптоволоконних системах.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Телекомунікації та радіотехніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку використаних джерел. У першому розділі проаналізовано літературні джерела щодо характеристик інформаційних сигналів та методів їх вимірювань, характеристик оптичних систем передачі.

У другому розділі розглянуто ефекти при передачі світла та способи підвищення якості передачі сигналів та пропускної здатності волоконно-оптичної системи передачі. У третьому розділі протестовано оптичний вимірювач та виміряно втрати за допомогою вимірювача оптичної потужності. У четвертому розділі досліджено реальну волоконно-оптичної лінії зв'язку та проаналізовано результати оптичних вимірювань.

Ключові слова: волоконно-оптична система передачі, метод зворотнього розсіяння, рефлектограма.

## ANNOTATION

Denisyuk K. Research and analysis of signal transmission capacity in fiber optic systems.

Master's qualification work of EP «Telecommunications and Radio Engineering». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The qualifications of a master's work consist of input, several sections, transfers and transfer of information cores. The first section analyzes the literature on the characteristics of information signals and methods of their dimming, and the characteristics of optical transmission systems.

Another section examines the effects of light transmission and ways to increase the transmission capacity of signals and the capacity of a fiber-optic transmission system. In the third section, the optical vibrating force was tested and the vimiryanno spending for additional vibrating the optical tension. In the fourth section, a real fiber-optic link line was monitored and the results of optical dimming were analyzed.

Key words: Fiber-Optic Transmission System, Gate Scattering Method, Reflectogram.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА.....	10
1.1 Аналіз інформаційних джерел в напрямку дослідження.....	10
1.2 Характеристики інформаційних сигналів.....	13
1.3 Характеристики волоконно-оптичних систем передачі.....	19
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	24
2.1 Ефекти при передачі оптичних сигналів.....	24
2.2 Класифікація та інформаційна структура оптичних сигналів.....	29
2.3 Методи ущільнення та кодування інформаційних потоків .....	35
2.4 Вплив фізичних факторів на функціональні можливості ВОСП .....	43
2.5 Способи підвищення якості передачі сигналів та пропускну здатності ВОСП.....	46
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	50
3.1 Випробування волоконно-оптичного кабелю .....	50
3.2 Тестування оптичного вимірювача в часовій області (OTDR).....	53
3.3 Вимірювання втрат за допомогою вимірювача оптичної потужності....	56
3.4 Тестування та моніторинг PON-мереж.....	57
РОЗДІЛ 4 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА .....	62
4.1 Організація передачі даних в одноволоконному режимі в оптичному каналі мережі ФТТВ з використанням Y-розгалужувача.....	62
4.2 Моделювання інформаційної безпеки у ВОСП.....	68
4.3 Практичне дослідження ВОЛЗ та аналіз оптичних вимірювань.....	71
4.4 Електромагнітна сумісність ВОСП з іншими системами передачі....	74
ВИСНОВКИ .....	76
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77
ДОДАТКИ.....	79

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

У цій пояснювальній записці застосовують такі скорочення:

ОВ – оптичне волокно;

ОК – оптичний кабель;

ВОСП – волоконно-оптична система передачі;

ВОЛЗ – волоконно-оптичні лінії зв'язку;

ОТ – оптичний тестер;

МЗР – метод зворотного розсіювання;

РД – регенераційна ділянка;

ВС – волоконний світловод;

SMF – Single Mode Fiber (стандартне одномодове волокно);

PCF – Photonic Crystal Fiber (фотонно-кристалічне волокно).

FDDI – Fiber Distributed Data Interface (розподілений інтерфейс передачі даних по волоконно-оптичних каналах);

SDH – Synchronous Digital Hierarchy (набір ієрархічних цифрових транспортних структур);

MPLS – Multi-Protocol Label Switch (багатопротокольна комутація на основі міток);

TDM – Time-Division Multiplexing (часове мультиплексування);

WDM – Wavelength Division Multiplexing (системи зі спектральним ущільненням каналів);

NGN – Next Generation Networks (мережі наступного покоління);

GPON – Gigabit Passive Optical Network (гігабітна пасивна оптична мережа).

TDM – Time Division Multiplexing (метод часового ущільнення потоків);

FDM – Frequency Division Multiplexing (частотний метод ущільнення);

MDM – Mode Division Multiplexing (модове ущільнення);

PDM – Polarization Division Multiplexing (ущільненням за поляризацією).

## ВСТУП

Будь-яка мережева технологія повинна забезпечити надійну та швидко передачу дискретних даних лініями зв'язку. І хоча між технологіями є великі відмінності, вони базуються на загальних принципах передавання дискретних даних. Ці принципи знаходять своє втілення в методах представлення двійкових одиниць і нулів за допомогою імпульсних або синусоїдних сигналів у лініях зв'язку різної фізичної природи, методах виявлення та корекції помилок, методах компресії та методах комутації.

Комфорт суспільства неможливий без таких ресурсів, як час, швидкість передачі та об'єм інформації. Передача інформації системами зв'язку на базі волоконних технологій має ряд переваг в порівнянні з іншими технологіями. Поява волоконно-оптичного зв'язку стала справжнім технічним прогресом і сьогодні оптоволоконні системи знаходять своє дедалі більше застосування в галузях, де необхідна передача даних, починаючи від персональних комп'ютерних систем обробки та передачі інформації до телекомунікаційних систем надвеликих відстаней.

Фізичне середовище передачі даних в даному випадку є оптоволоконним кабелем, сполучних роз'ємів та іншого активного телекомунікаційного обладнання через які поширюються електромагнітні хвилі.

У глобальних мережах першочерговою задачею є забезпечення якісної передачі сигналів на відстані в сотні-тисячі кілометрів. Тому без підсилювачів сигналів, встановлених через певні відстані, побудувати територіальну лінію зв'язку неможливо. У глобальній мережі необхідна також і проміжна апаратура іншого роду – мультиплексори, демультимплексори та комутатори. Ця апаратура розв'язує другу зазначену задачу, тобто створює канал із некомутованих відрізків фізичного середовища – кабелів з підсилювачами.

Наявність проміжної комутаційної апаратури дає змогу прокласти окрему кабельну лінію для кожної пари з'єднаних вузлів мережі. Тобто, між мультиплексорами і комутаторами використовується високошвидкісний

волоконно-оптичний кабель, по якому передається інформація.

Метою роботи є ознайомлення з основами теорії передачі інформації у волоконно-оптичних лініях зв'язку та застосування оптимального телекомунікаційного обладнання задля підвищення якості та завадостійкості таких систем.

Наукова новизна одержаних результатів: обґрунтовано методи ущільнення та кодування інформаційних потоків для підвищення якості передачі сигналів у оптоволоконних системах.

Практичне значення одержаних результатів. Результати можуть бути використані для підвищення функціональних можливостей та пропускної здатності волоконно-оптичних систем передачі сигналів.

Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням наступних основних наступних завдань:

- здійснити огляд інформаційних джерел в області передачі та підвищення якості оптичних сигналів;
- встановити основні процеси поширення оптичних сигналів у ВОСП;
- проаналізувати технічні засоби та можливості при телекомунікацій-них вимірюваннях;
- здійснити аналіз параметрів та тестування PON-мереж.

Об'єкт дослідження: принципи ущільнення і кодування інформаційних потоків та способи підвищення якості передачі сигналів і пропускної здатності ВОСП.

Предмет дослідження: фізичні процеси при поширенні оптичних сигналів в оптоволоконні.

Апробація результатів роботи була представлена у вигляді тез (додаток А) «Застосування принципів спектрального ущільнення для збільшення пропускної здатності оптоволоконна» у XIII-Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». 28 листопада 2025 року, с.131-133 [12].

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

### 1.1 Аналіз інформаційних джерел в напрямку дослідження

У сучасних реаліях стійке функціонування систем передачі інформації досягається високою пропускною спроможністю систем зв'язку. Розвиток та поширення мереж зв'язку в Україні та необхідні для їхнього функціонування швидкості передачі свідчать про необхідність значного підвищення їхньої пропускної здатності, що передбачає комплексне використання волоконно-оптичних засобів передачі та обробки інформації (ВОСП) з переважним забезпеченням автоматичної комутації.

У сучасних ВОСП здебільшого застосовується модуляція оптичної несучої за інтенсивністю. У цьому випадку їхні пропускні здатності відносно малі, тобто неефективно використовується спектральна смуга вікна прозорості одномодового оптичного волокна. При цьому, встановлені в них ретрансляційні пункти регенеративного типу з перетворенням оптичних сигналів на електричні, ускладнює створення прозорих оптичних трактів. Аналіз стану та напрямів розвитку оптоволоконних мереж на сьогоднішній день висуває задачу розробки перспективних засобів зв'язку на основі застосування нової компонентної бази, використанням інформаційних технологій та урахуванням характеристик нових компонентів і вузлів [3, 13].

Для передачі інформації застосовують оптичне волокно, що є діелектричним спрямовуючим середовищем, призначеним для поширення електромагнітних хвиль оптичного та інфрачервоного діапазонів. Оптичне волокно має коаксіальну конструкцію і складається з серцевини, оболонки та первинного акрилатного покриття і характеризується профілем показника заломлення.

Швидкість і пропускна здатність ВОСП визначаються можливостями оптичних хвилеводів та швидкодією елементної бази приладів, що

функціонують у ВОСП. Удосконалення елементної бази залежить технології виробництва і створення нових матеріалів з поліпшеними електрофізичними характеристиками.

Електричний сигнал у вигляді, зручному для передачі оптичним каналом, надходить на вхід оптичного передавача. Оптичний передавач здійснює модуляцію оптичного випромінювання електричним інформаційним сигналом.

Генерація оптичного випромінювання здійснюється випромінювачем на основі лазерного або світловипромінювального діода з вбудованою схемою керування і стабілізації оптичної потужності. Це випромінювання вводиться в оптичне волокно (ОВ) волоконно-оптичного тракту передачі (ВОТ). ВОТ служить для передачі оптичного сигналу джерела до віддаленого приймача. Цей сигнал надходить на фотоприймальний пристрій (ФПП), який зазвичай складається фотодетектора (фотодіода), каскаду попереднього посилення і порогового пристрою (компаратора). Потім електричний сигнал надходить або на вхід декодуючого пристрою або безпосередньо на той чи інший кінцевий виконавчий вузол.

Висока якість і масиви сучасних інформаційних потоків зростають великими темпами, що продукує задачу передачі з мінімальними втратами інформації. Швидкий і надійний спосіб передачі даних різних технологічних систем (обчислювальні мережі, системи сигналізації, безпілотні літаючі апарати тощо) набуває все більшої значущості в останні роки. Сьогодні, як було сказано вище, середовищем передачі великих масивів даних є оптичне волокно (ОВ) із-за високої пропускної здатності [3].

На сьогодні активно впроваджуються волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ), що працюють в оптичному діапазоні й дають змогу передавати точнішу інформацію, підвищуючи її надійність і захищеність. Аналіз показує, що ВОСП мають низку переваг порівняно з іншими методами передачі інформації. За рахунок своєї високої швидкості передачі інформації об'єм даних передається швидше, ніж в електричних лініях зв'язку. Довжина ВОСП досягає 100 км і більше при малих затуваннях світлового сигналу [6].

Передавана інформація по ВОСП захищається від несанкціонованого доступу за допомогою різних способів кодування, шифрування, застосування спеціальних пристроїв [5].

Як результат, ВОСП є невід'ємною частиною людства і знаходить застосування у всіх сферах життя, а впровадження нових мобільних комунікацій 5G буде диктувати подальший етап у розробці волоконно-оптичних технологій у системах передачі даних.

У ВОСП використовують одномодові та багатомодові ОВ (рис. 1.1). Для передачі інформації на великі відстані рекомендовано використання одномодового ОВ. Пропускаючи одиничний світловий сигнал, воно має низьке значення загасання. Одномодове ОВ має менший діаметр сердечника: близько 7...9 мкм. Багатомодові ОВ використовують на коротких відстанях, передаючи кілька світлових сигналів [6].

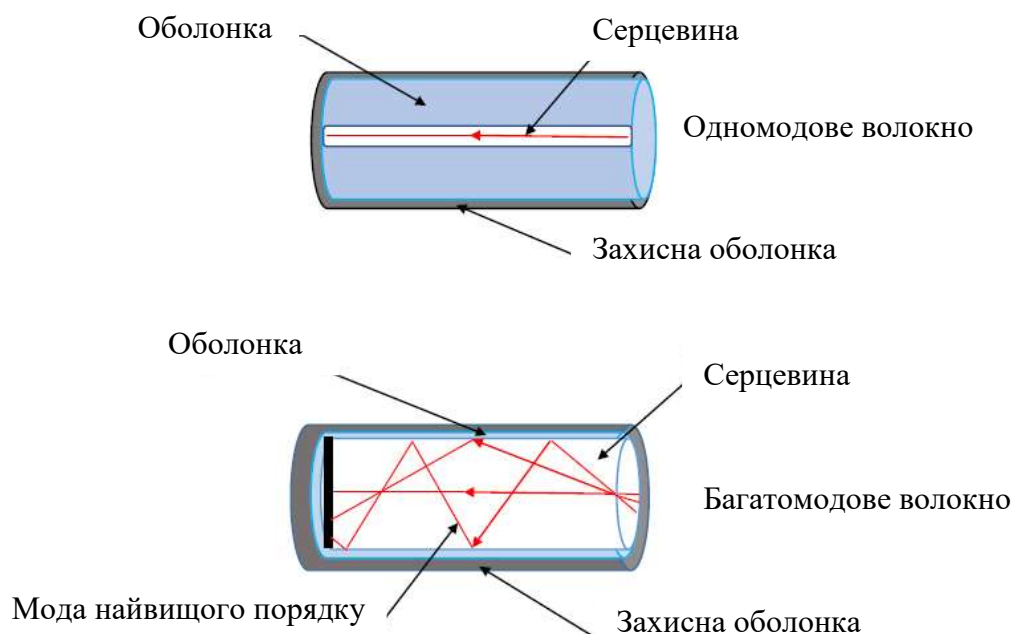


Рисунок 1.1 – Структура оптичного волокна [6]

Узагальнимо переваги оптоволоконного кабелю. Сюди відносять високу пропускну здатність, що складає до 10Гбіт/с і більше. Це перевищує можливості кабелю «вита пара» чи коаксіального кабелю. Слід зазначити, що в

оптичного кабелю швидкість передачі може бути різною, що визначається тими чи іншими телекомунікаційними пристроями. Одномодовий оптичний кабель здатний забезпечувати набагато більшу пропускну здатність, ніж багатомодовий.

Наступною перевагою є швидкість передачі інформації. На відміну від мідних кабелів, оптоволоконні здатні передавати дані на значно більші відстані, з вищою швидкістю і без суттєвої втрати сигналу. Це можливо завдяки передачі сигналу у формі світлових променів. Оптичний кабель вільний від обмежень, наявних у мідного кабелю. Слід відміти, що відстань можливої передачі сигналу залежить від типу застосовуваного кабелю, структури мережі та довжини хвилі, що варіюється в межах від 550 метрів для багатомодового кабелю і аж до 40 кілометрів для одномодового кабелю.

Підвищена безпека також займає чільне місце в оптоволоконних системах. Сигнали, що передаються оптичним каналом, не генерують випромінювань і тому їх майже неможливо перехопити. Якщо ж на лінії є пошкоджена ділянка, то її легко відстежити за допомогою рефлектометрів завдяки призупиненню світлового потоку, що призводить, зрештою, до повної зупинки передачі інформації. Також важливою особливістю оптоволоконних кабелів є те, що всі мережеві прилади та обладнання, що використовується, можна розмістити централізовано, в одному місці [6].

Надійність мережі, побудованому на оптоволоконні висока. Центр оптоволоконної жили виконаний з діелектричного матеріалу (скла), що нечутливий до електричного струму. Оптичний кабель можна прокласти поряд з силовими електричними, також він не чутливий до перепадів температури і може бути прокладений навіть у водному середовищі.

## **1.2 Характеристики інформаційних сигналів**

Як відомо поширення світла у світловоді чи оптоволоконні базується на законах геометричної оптики [4]. Із-за наявності дисперсії показника

заломлення, ці закони справедливі лише для хвиль, частоти яких невеликі порівняно з частотою внутрішніх процесів в атомах чи молекулах.

Поширення світла у оптоволокну відбувається внаслідок повного внутрішнього віддзеркалення на межі ядра та оболонки. Для успішного функціонування оптоволокна на основі кварцу коефіцієнт заломлення ядра повинен бути більшим, ніж у оболонки. Коефіцієнт заломлення серцевини кварцевого скла  $\text{SiO}_2$  підвищують шляхом легування домішками германію  $\text{GeO}_2$  та титану  $\text{TiO}_2$ . Для зменшення коефіцієнта заломлення оболонки використовують домішки оксиду барію  $\text{Ba}_2\text{O}_3$ . Різниця згаданих показників заломлення при цьому повинна не перевищувати 0,005.

При падінні світлової хвилі на границю розділу двох діелектриків кут між напрямом заломленої хвилі  $\alpha_2$  і нормаллю до границі розділу пов'язаний з кутом падіння  $\alpha_1$  законом заломлення Снеліуса. Згідно рисунка 1.2 причиною функціонування оптоволокна, є те, що в ньому може поширюватись інформація.

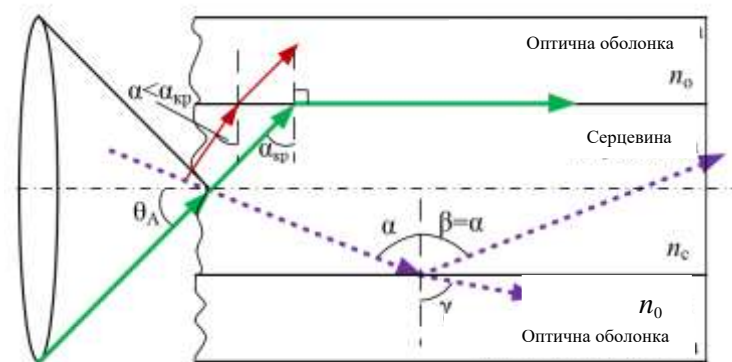


Рисунок 1.2 – Структура оптоволокна: 1 – світло; 2 – оболонка; 3 – захисне покриття; 4 – серцевина [4]

Як відомо з [4] закон заломлення виражається рівнянням (1.1):

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.1)$$

де  $n_2$  і  $n_1$  – це заломлювальні показники двох середовищ.

Якщо світлова хвиля із оптичного середовища вищої густини 1 падає на границю розділу оптичного середовища нижчої густини 2, то повне відбиття в першому середовищі відбувається при  $\alpha_1 > \alpha_{кр}$ , де  $\alpha_{кр} = \arcsin(n_2 / n_1)$  є критичним кутом падіння, при якому заломлений промінь починає ковзати по границі розділу. Тому світловий промінь поширюється в світловоді вздовж по зигзагоподібній траєкторії.

Електромагнітне поле світлової хвилі частково заходить в оболонку, але його напруженість у ній експоненціально зменшується в міру віддалення від межі розділу. Цей ефект називається оптичним тунелюванням. Енергія падаючої хвилі повністю повертається в перше середовище, але місця заходу падаючої і виходу відбитої хвилі на межі розділу зміщені відносно один одного на відстань близько половини довжини хвилі. Щоб унеможливити незворотні втрати енергії частини хвилеводних мод, які поширюються за межами хвилеводного шару, використовується оптично прозора оболонка.

Інша властивість волоконного світловода (ВС), характерна для певної довжини хвилі, це нормалізована частота, величина якої визначається з рівняння:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \sin \Theta_{max}, \quad (1.2)$$

де  $a$  – радіус серцевини світловода, м;

$\lambda$  – довжина хвилі, мкм.

Множник  $\sin \Theta_{max} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$  у правій частині рівняння (1.2) називається числовою апертурою (NA), і визначає максимальний кут  $\Theta_{max}$  відхилення променя від осі світловода, до якого виконується закон повного внутрішнього відбиття. Числова апертура характеризує світло-збиральну здатність волокна. Кількість оптичної потужності, що сприймається оптичним волокном, змінюється пропорційно квадрату NA.

Довжину хвилі випромінювання джерела випромінювання вибирають,

виходячи з умови мінімуму втрат у серцевині світловода. Наприклад, у кварцовому склі мінімум втрат 0,2 дБ/км спостерігається на довжині хвилі 1,3 мкм. На цій довжині хвилі мінімальна сума релеєвських втрат, пов'язаних із розсіюванням на локальних неоднорідностях кристалічної структури та інфрачервоних втрат, зумовлених збудженням різних осциляторів у кристалічних решітках.

Робочими діапазонами довжин хвиль для ВОСП є три вікна прозорості:

- 820...900 нм;
- 1280...1350 нм;
- 1528...1620 нм.

Частоти для останнього вікна визначаються з рівнянь (1.3):

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,528 \cdot 10^{-6}} = 196 \cdot 10^{12} \text{ Гц}; \quad f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,62 \cdot 10^{-6}} = 185 \cdot 10^{12} \text{ Гц}. \quad (1.3)$$

Звідси корисна робоча смуга цього вікна дорівнює  $196 - 185 = 11$  ТГц, або 11000 ГГц. Ця ширина смуги в 110 разів більша за ту, що використовується в радіочастотній частині спектра.

Дальність передачі ділиться на невелику відстань, середню відстань і велику відстань. Зазвичай передача на коротких відстанях – це відстань передачі менше 2 км, на середньому відстані – 10...30 км. Більше 30 км – це передача на великі відстані. Довжина хвиль світла, що використовується в оптичному волокні відповідно до градацій дальності становить 850 нм, 1310 нм, 1550 нм. Ці три довжини хвилі мають майже нульове поглинання, яке найбільше підходить для пропускання через волокно.

Характеристики довжин хвиль:

– 850 нм: режим багатомодового зв'язку, послаблення сигналу (затухання) є відносно великим, а оптичний модуль на довжину 850 нм з передавачем джерела світла і ціною перетворювача сигналу значно нижчі, ніж у пристроїв на довжини 1310 нм та 1550 нм. Таким чином, більшість

багатомодових оптичних волокон з робочою довжиною хвилі 850 нм оптичного модуля придатні для передачі зв'язку;

– 1310 нм: волокно до 1310 нм має менше затухання біля 0,35дБ/км, з багатомодовим, максимальна відстань передачі складає 2 км, з одномодовим максимальна відстань передачі 40 км;

– 1550 нм: затухання волокна на довжині хвилі 1550 нм порівняно невеликі, приблизно 0,19 дБ/км. Тому потребується та сама потужність, що й для попередньої довжини хвилі, але на більшу відстань.

Загасання у волоконному світловоді є його однією з важливих характеристик. Існують два основні параметри, які обмежують довжину волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП). Цими параметрами є втрати, що виражаються в дБ/км, і дисперсія, що є добутком ширини смуги на довжину лінії – МГц·км. Чим менші ці величини, тим більшою може бути відстань між регенераційними ділянками і повторювачами [4].

На загасання світла у волокні впливають такі чинники, як: втрати на поглинання, втрати на розсіювання, кабельні втрати. Втрати на поглинання і на розсіювання разом називають власними втратами, а втрати на стиках – додатковими або кабельними втратами.

Повне загасання у волокні вимірюється в дБ/км і визначається сумою:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_k, \quad (1.4)$$

де  $\alpha_n$  – втрати на поглинання;

$\alpha_p$  – втрати на розсіювання;

$\alpha_k$  – втрати в кабелі.

Втрати на поглинання та розсіювання є власними втратами. Домішкові центри поглинають світло на певних довжинах хвиль і розсіюють поглинену світлову енергію у вигляді джоулівського тепла. Власні втрати на поглинання зростають, і стають високими в ультрафіолетовій та інфрачервоній областях. При довжині хвилі випромінювання вище 1,6 мкм звичайне кварцове скло стає

непрозорим через зростання втрат, пов'язаних з інфрачервоним поглинанням.

Зменшенню загасання в короткохвильовому діапазоні перешкоджає Релеївське розсіювання, спричинене наявністю у волокні неоднорідностей мікроскопічного масштабу. Світло, потрапляючи на такі неоднорідності, розсіюється в різних напрямках, внаслідок чого частина його втрачається в оболонці. Втрати при Релеївському розсіюванні залежать від довжини хвилі за законом  $\lambda^{-4}$  і сильніше проявляються в області коротких довжин хвиль.

Довжина хвилі, на якій досягається нижня межа власного загасання чистого кварцового волокна становить 1550 нм. На довших хвилях переважає інфрачервоне поглинання, на коротших – Релеївське розсіювання.

Типові характеристики затухання оптичного волокна залежно від довжини хвилі показані на рисунку 1.3.

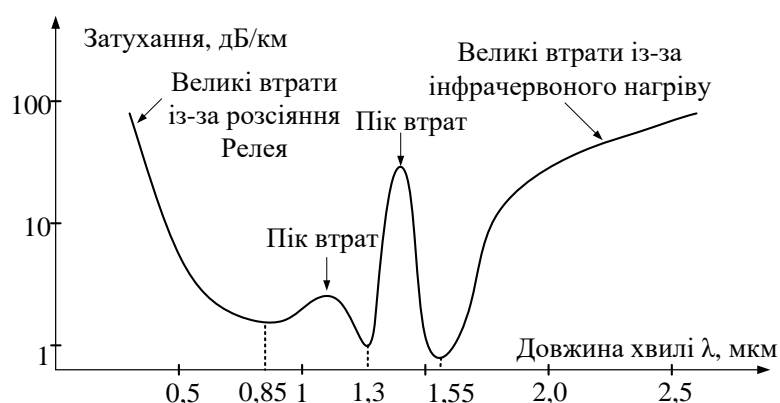


Рисунок 1.3 – Типові характеристики затухання оптоволокна [6]

Розсіювання веде не тільки до послаблення сигналу, що проходить, а й до збільшення зворотного світлового потоку. Зворотне відбиття починає даватися взнаки в оптичних лініях широкосмугового цифрової передачі, широкосмугової аналогової передачі або в магістральних лініях із великим числом роз'ємних сполучень. Оптичний сигнал, поширюючись по волокну, відбивається від різних неоднорідностей, в оптичних з'єднувачах. У результаті такого відбиття частина енергії повертається назад. Якщо як джерела випромінювання використовуються лазерні діоди, то відбитий сигнал, потрапляючи в резонатор

лазера, здатний індуковано посилюватися, призводячи до появи паразитного сигналу.

Для придушення зворотного потоку застосовуються оптичні ізолятори. У них використовується ефект обертання площини поляризації світла в речовині під дією магнітного поля (ефект Фарадея). Оптичний ізолятор забезпечує пропускання світла в прямому напрямку майже без втрат, а у зворотному – з великим загасанням.

Додаткові (кабельні) втрати виникають через варіації діаметрів серцевин, показників заломлення, числових апертур, ексцентриситетів серцевина/оболонка і концентричностей серцевини у волокон з різних сторін на стиках. Крім того, кабельні втрати зумовлені скручуванням, деформаціями і вигинами волокон, що виникають під час накладення покриттів і захисних оболонок, під час виробництва і прокладання кабелю.

### **1.3 Характеристики волоконно-оптичних систем передачі**

Сучасні волоконно-оптичні системи передачі поєднують в собі використання фундаментальних наук таких, як фізика, математика, хімія, комп'ютерні технології та інші. Вони повинні мати високу швидкість, широкосмугову мережу, стабільність, надійність, високу ступінь надійності передачі інформації.

Особливості волоконно-оптичних систем передачі, в яких принципово відсутнє значущий для практики взаємовплив окремих кіл зумовлено тим, що носієм інформації є потік фотонів. Особливості оптичного діапазону і використовуваної елементної бази накладають свої обмеження [2, 8].

Основними недоліками волоконно-оптичних ліній зв'язку є: схильність світловодів до радіації, що викликає появи плями затемнення; воднева корозія скла, що породжує мікротріщини у світловоді.

Структура ВОСП зображена на рисунку 1.4 і включає в себе такі компоненти:

- передавач, що перетворює електричний сигнал в світловий;
- волоконно-оптичний кабель;
- приймач, що приймає світловий сигнал і перетворює його в електричний сигнал;
- додаткове обладнання: конектори для під'єднання волокна до джерела, детектора і для з'єднання волокон між собою.

В передавачі трансформацію реалізує джерело (лазер або світловипромінюючий діод), що повинно мати високу потужність випромінювання. Керуючий пристрій перетворює вхідний сигнал в сигнал визначеної форми, необхідний для керування джерелом.

Можливості лазерного випромінювання для передачі інформації в десятки тисяч разів перевищують можливості радіовипромінювання. Лазер є оптичним квантовим генератором і генерує когерентне випромінювання, використовує вимушене випромінювання активного середовища, а світловипромінювальний діод – спонтанне. Зрозуміло, що оптичні характеристики джерела й оптичного волокна мають бути узгоджені.

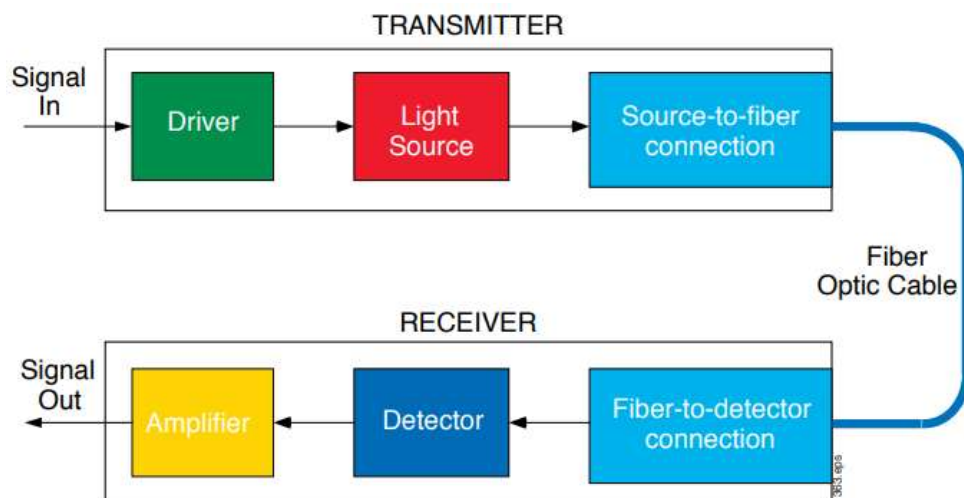


Рисунок 1.4 – Структура передачі оптичних сигналів [2]

Для оцінки вихідної потужності передавача слід знати потужність лазера, діаметр і апертуру волокна та джерела та орієнтовні втрати в з'єднувачі. На якісні показники волоконно-оптичних систем передачі впливають параметри

оптичних компонентів, а якість сигналу в цих системах залежить від відношення середньої енергії сигналу до середньої енергії шумів різної природи. Шум – обов’язковий ефект, а будь-яке збурення електричного або оптичного характеру, відрізняється від корисного сигналу.

Для перетворення оптичного сигналу в електричний струм використовують детектор на лавинних фотодіодах. Шум обмежує роботу приймача і визначає рівень мінімальної детектованої потужності. Чутливість приймача є одним з основних параметрів і визначає мінімальний за потужністю оптичний сигнал, який може бути оброблений. До фотодіодів у волоконно-оптичних системах передачі висуваються такі вимоги: висока чутливість, необхідні спектральна характеристика і широкосмуговість, низький рівень шумів, необхідна швидкодія та значний термін служби. Вихідні пристрої приймача підсилюють сигнал за необхідності і змінюють його форму [8].

Обрана та чи інша технологія волоконно-оптичної системи передачі залежить від дистанції передачі, додатків клієнта, вимог пропускної здатності та швидкості передачі. Під час проектування волоконно-оптичних систем передачі важливо визначити очікуване зростання в перспективі об’ємів передачі даних на вузлі (резерв пропускної спроможності ліній зв’язку), оскільки монтаж додаткових оптичних волокон у прольоті кабелю обходиться дорожче. Волоконно-оптичні мережі сьогодні легко можна модернізувати для передачі великого об’єму інформації шляхом заміни тільки приймально-передавального обладнання.

Вибір робочої довжини диктується додатками, що використовуються в системі. Наприклад, стандарт FDDI (Fiber Distributed Data Interface) – розподілений інтерфейс передачі даних по волоконно-оптичних каналах вимагає передачі на довжині хвилі 1300 нм. Цю довжину хвилі рекомендується використовувати у всій мережі, що унеможливить проблеми із сумісністю передавального і приймального устаткування.

« Мережа FDDI будується на базі двох оптоволоконних кілець, що утворюють основний і резервний маршрути передачі даних між вузлами

волоконно-оптичної мережі. Для підвищення відмовостійкості вузли підключаються до обох кілець. У разі відмови (обриву кабелю, відмові вузла) первинне кільце шунтується із вторинним, утворюючи одне кільце. Така операція реалізується концентраторами або мережевими адаптерами FDDI » [5].

По мірі руху світла оптичним волокном відбувається втрата оптичної потужності, тобто її затухання. Вибір типу кабелю пов'язаний із тим, що оптичне волокно з меншими втратами і широкою смугою пропускання приймає менше світла, ніж оптичне волокно з більшими втратами і меншою смугою пропускання.

Багатомодові оптичні волокна ефективно збирають світло від легкодоступних світло-випромінювальних діодів і мають низьку пропускну здатність, а одномодові оптичні волокна мають смугу пропускання на багато порядків вищу. Тому на порівняно коротких дистанціях застосування багатомодового оптичного волокна з великими внутрішніми втратами дасть менше загасання сигналу і є більш вигідним.

Синхронна цифрова ієрархія SDH (Synchronous Digital Hierarchy) – набір ієрархічних цифрових транспортних структур (циклів), стандартизованих для транспортування відповідно адаптованого навантаження для передачі через фізичну мережу. Сьогодні вона витісняється на електричному рівні – технологіями MPLS (Multi-Protocol Label Switch, багатопротокольна комутація на основі міток) – Transport Profile, а на фотонному рівні – технологіями оптичної транспортної ієрархії. Це забезпечує прозорість передачі і крос-комутації сукупності традиційного TDM (Time-Division Multiplexing, часове мультиплексування) – і пакетного трафіку в будь-якому поєднанні з подальшою їхньою передачею каналами систем із поділом каналів за довжиною хвилі оптичного випромінювання (систем зі спектральним ущільненням каналів) – WDM (Wavelength Division Multiplexing).

Суть методу WDM полягає в тому, що множина незалежних інформаційних потоків (сигналів), що передаються кожен на своїй оптичній несучій, за допомогою оптичних мультиплексорів об'єднуються в один

оптичний сигнал, після чого він поступає в оптичне волокно. На приймальній стороні проводиться зворотна операція демультимплексування. Таким чином технологія WDM дає змогу збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних систем передачі.

Системи зі спектральним мультимплексуванням дають змогу нарощувати швидкість передачі трафіку по прокладеному вже раніше оптичному кабелю.

Сьогоднішнє вимушене зростання пропускних спроможностей і об'єму трафіку створюють проблеми, пов'язані з наслідками від втрат. Це вимагає додаткових систем керування і моніторингу, що дають змогу прямо з центру технічної підтримки контролювати роботу клієнтського обладнання. В сучасних оптичних мережах NGN (Next Generation Networks) широко використовується технологія GPON (Gigabit Passive Optical Network), що має вбудований механізм доступу до мережевого трафіку, що гарантує високу швидкість доступу та якість надання послуг. Високошвидкісний доступ GPON надає канали 40 Мбіт/с (від станції до споживача послуг) на клієнта [2].

Підсумовуючи сказане, можемо констатувати, що оптичні технології GPON, дають змогу будувати високошвидкісні мережі з високою швидкістю доступу. З іншого боку в оптоволоконні системи необхідно впроваджувати системи моніторингу мереж і послуг зв'язку.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Ефекти при передачі оптичних сигналів

Оптичні волокна мають множину специфічних фізичних властивостей. Вони впливають на смугу пропускання, загасання і якість сигналу під час передачі. У багатомодових волокнах головним фактором, що впливає на якість сигналу є модова дисперсія. Вона детальніше аналізуватиметься у пункті 2.3 даної роботи.

Зупинимось детальніше на втратах, яких зазнають оптичні волокна, які мають аналогію з іншими фізичними середовищами, що проводять електромагнітну енергію. Зазначена властивість полягає в експоненціальному зростанні втрат енергії, яка прямопропорційна довжині волокна. Це показано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Крива згасання для оптоволоконна [5]

Ця діаграма показує, що з кожним новим приростом довжини волокна вихідна потужність зменшується вдвічі, тобто волокно поглинає енергію за експоненціальним законом. Слід відмітити, що радіохвилі також зазнають подібного загасання під час поширення у повітрі.

У процесі виробництва оптоволоконна виробники стараються докласти

максимум досвіду, щоб запроектувати і випустити на ринок скло високої чистоти. Вимоги виробництва щодо якості оптоволокна такі ж строгі, як і в напівпровідниковій промисловості. На практиці, неможливо виробляти ідеальне оптоволокно. Домішки, що залишаються в склі, будуть поглинати світлову енергію і приймають форму іонізованих молекул. Головними домішками є іони металів, таких, як залізо, мідь і нікель. Вони поглинають світлові частинки (фотони) і в процесі передачі енергії волокно нагрівається.

Як відомо, у волокнах спостерігаються два види втрат через розсіювання. Перший вид виникає із-за того, що будь-які вироблені натуральні матеріали ніколи не мають досконалу молекулярну структуру по всьому об'єму матеріалу. Якщо переріз оптичного волокна помістити під електронний мікроскоп, то в його молекулярній структурі можна спострігати неоднорідність його структури, адже атоми і молекули випадкові за своєю природою розміщуються хаотично під час виготовлення матеріалу.

Нерівномірності будуть розсіювати деяку кількість світлових хвиль у світловоді, коли вони проходять по довжині волокна, а це розміяння називають розсіюванням Реллея. Ступінь розсіювання дуже швидко зменшується зі збільшенням довжини хвилі, і нижчі втрати розсіювання досягаються при використанні інфрачервоних хвиль (1300 і 1550 нм). Втрати розсіювання Релея в розплавленому кварцовому склі становлять приблизно 0,8 дБ на кілометр при довжині хвилі 1 км.

Другий вид втрат через розсіювання виникає через нерівномірності поверхні сердечник-оболонка. Коли промінь світла стикається з такою нерівномірністю, він може змінити моду на вищу і розсіятися в оболонці. Це веде до більшого загасання сигналу. Наявне розсіювання змушує світло часто змінювати моди. Наприклад, мода нижчого порядку може розсіятися і стати модою вищого порядку. Це називають сполученням мод або змішуванням мод. Змішування мод може дещо зменшити модову дисперсію із-за усереднення проходячих світлових променів відстаней [1, 5].

На практиці при розрахунках і проектуванні ВОСП помилково враховують

втрати із-за згину волокна. Оскільки внутрішня область волокна для світлових променів у нормі має аналогію з дзеркалом і невеликі вигини волокна не привносять втрат, тобто їх можна не враховувати. Втрати виникають лише тоді, коли вигин великий і змушує промені світла падати під кутом, меншим за критичний. Таке можливо, коли промінь прямо падає на вигин під кутом, меншим за критичний, або якщо промінь відбивається від вигину, а потім входить в оболонку під кутом менше критичного. Виробник кабелю вказує норму мінімального радіусу вигину під час монтажу для даного волоконно-оптичного кабелю.

Розрізняють втрати при макрозгинах та мікрозгинах (рис. 2.2). Коли кабель встановлений з вигином, радіус якого менший мінімально допустимого, тоді світло буде падати на поверхню під кутом меншим за критичний  $\theta_k$  і промінь буде втрачатись в оболонці.

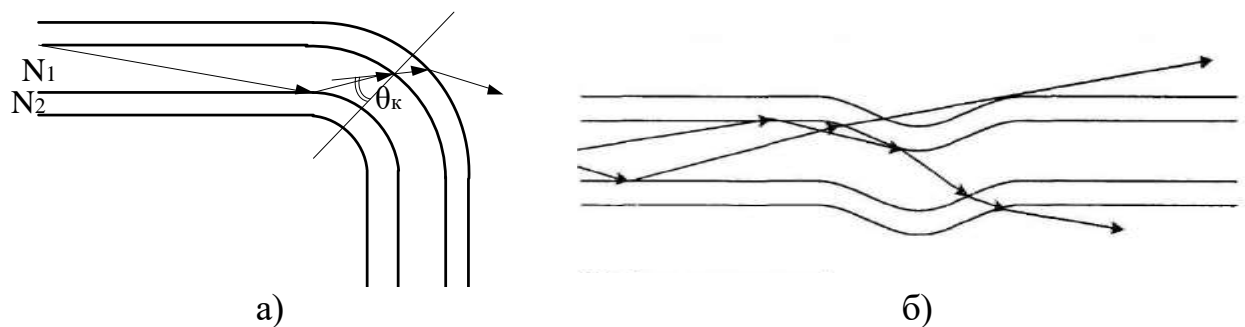


Рисунок 2.2 – Умовне зображення втрат при макрозгині (а)  
і при мікрозгині (б) [5]

Мікрозгини можуть бути спричинені недосконалістю оболонки, хвилястістю поверхні сердечника чи оболонки, дрібними тріщинами волокна і зовнішніми силами. Зовнішні сили можуть виникнути через важкі та гострі предмети, покладені поперек кабелю або через зацемлення кабелю під час його протягування. Як і у випадку з макровигинами, світловий промінь падатиме під кутом, меншим за критичний, і проникатиме в оболонку і також, як і в попередньому випадку розсіюватись.

Аналіз поля енергії світлового імпульсу, що проходить по волокну, показує, що певна частина світлової енергії переноситься через оболонку волокна. Це особливо помітно в багатомодових волокнах з плавним профілем і одномодових волокнах зі ступінчастим профілем, де різниця показників заломлення сердечника-оболонки мінімальна. Коли у волокні зустрічається вигин, променям, що рухаються за більшою траєкторією, буде потрібно рухатися з більшою швидкістю, ніж променям, що рухаються в центрі сердечника. Природно, світло буде чинити опір цьому і прагнути випромінюватися назовні.

Кількість енергії, що втрачається на зовнішній стороні радіусів вигинів, зазвичай мала. Але якщо від зовнішніх променів світла потрібно рухатися швидше за швидкість світла через дуже різкий загин волокна (тобто з дуже маленьким радіусом), тоді втрати випромінювання стають досить значними і можуть бути катастрофічними для лінії передачі. Радіус, при якому це виникає, дуже малий і складає близько 60 мкм залежно від виду використовуваного оптичного волокна. Це ще одна причина уникати мікрозгинів.

Встановлено, що в місці з'єднання сердечника й оболонки під час падіння світла з кутом, меншим за критичний, близько 4% світлової енергії відбивається назад у сердечник. Це відбиття Френеля, що відзначається також на стику двох волокон. Навіть якщо два волокна з'єднані з абсолютно плоскими гладкими кінцями, все одно залишається неминуча зміна показників заломлення через невеликий об'єм повітря між волокнами [7].

Ці втрати спостерігаються в кожному інтерфейсі при переході зі скла в повітря або навпаки). Тоді, загальна кількість енергії, що втрачається дорівнює 8%. При оцінці втрати потужності в каналі зв'язку це відповідає втраті приблизно 0,17 дБ на інтерфейс між волокном і повітрям та 0,34 дБ на з'єднання двох волокон.

Для одномодових волокон подібний аналіз показує, що зазор між волокнами, що перевищує радіус волокна більше, ніж в 10 разів, створює саме такі втрати на рівні 0,4 дБ.

Невідповідність розмірів волокна і числових апертур також мають вплив на загальні втрати в оптоволокну. На практиці зустрічається випадки, коли потрібно з'єднати волокна різних розмірів і з різними апертурами. Якщо волокно, з якого випромінюється світло має більший діаметр за волокно, що отримує світло, то світлові промені будуть «втікати» через краї більшого волокна. Якщо у двох волокон однакові діаметри, але різні апертури і у волокна, що випромінює світло, апертура більша, це волокно втрачатиме частину своєї енергії через заломлення променів в оболонку другого волокна. Якщо у волокна, з якого випромінюється світло, діаметр або апертура менші, ніж у волокна, що приймає, сигнал втрачатися не буде.

Ці трактування щодо апертур показані на рисунку 2.3.

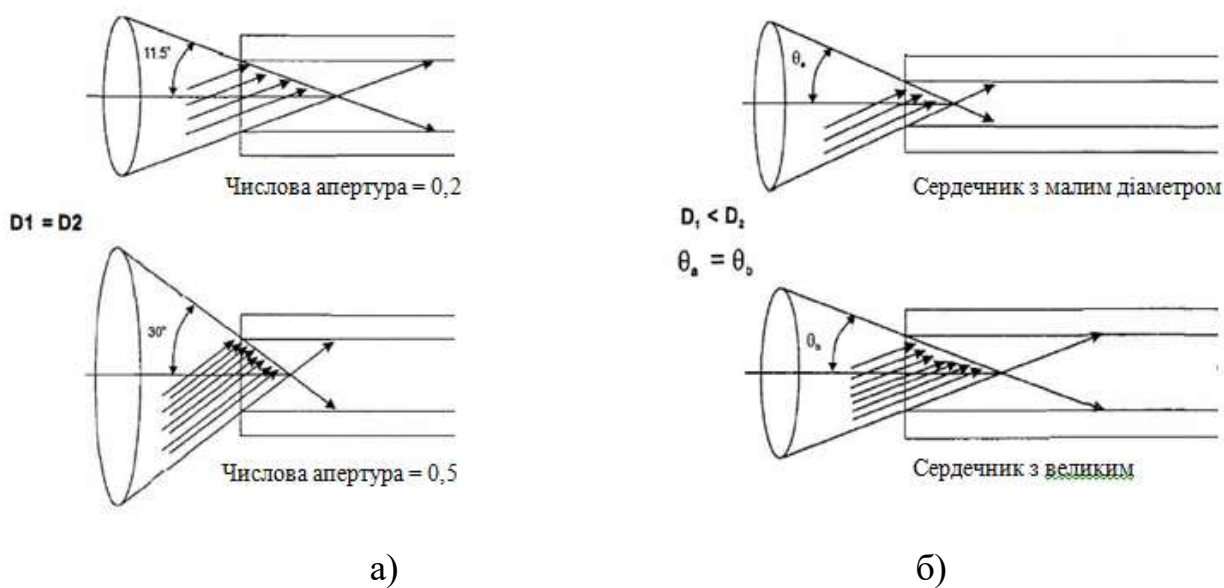


Рисунок 2.3 – Розповсюдження світла у волокнах з однаковими діаметрами і різними кутами (а), з різними діаметрами і однаковими кутами (б) [7]

Для одномодових волокон зі ступінчастим профілем показника заломлення числова апертура дорівнює:

$$NA = \sin \varphi = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 1. \quad (2.1)$$

В наведеній вище формулі  $\varphi$  – половина вхідного кута конуса (рис. 1.2).

На рисунку 2.4 показано характеристику затухання оптоволоконна по довжині з різними ефектами, наведеними вище.

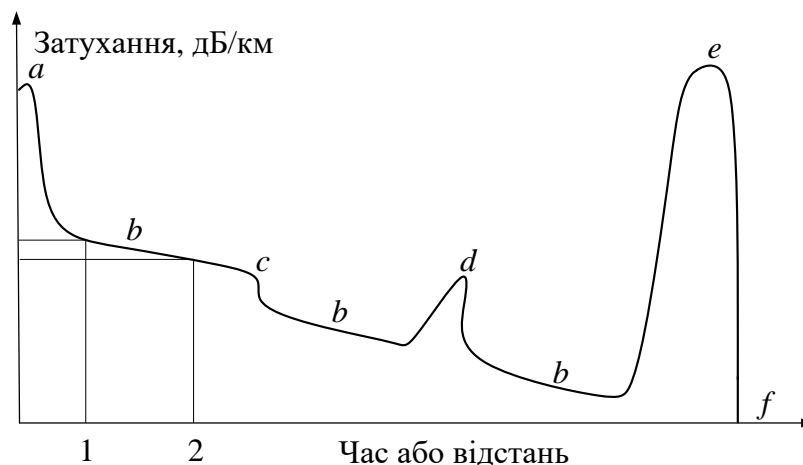


Рисунок 2.4 – Втрати з різними формами зміни затухання [2]

Підсумовуючи вище сказане, можемо констатувати, що сумарна величина втрат визначає якість оптичного волокна і підсумку якості надання телекомунікаційних послуг. Тому мінімізація втрат є актуальним завданням, а способи удосконалення будуть розглянуті пізніше у даній роботі.

## 2.2 Класифікація та інформаційна структура оптичних сигналів

В основі формування моделей хвильових оптичних сигналів і правил їхнього аналізу лежать фізичні явища, зокрема, інтерференція і дифракція світлових хвиль. Інтерференція описує відповідно до принципу суперпозиції лінійне підсумовування оптичних сигналів в області накладення хвильових фронтів. Явище дифракції виражається у формуванні ефектів, що враховують явище відхилення від законів геометричної оптики [2, 7].

Для опису явища інтерференції та дифракції хвиль достатньо розглядати скалярний характер поширення оптичних хвиль, не вивчаючи специфічні особливості їхньої електромагнітної природи. Цей підхід називають скалярною апроксимацією світла. Тому нижче світлова хвиля визначається лише

амплітудою, фазою, довжиною хвилі та швидкістю поширення.

В оптиці виділяють:

- генератори (джерела) хвильових сигналів;
- хвильові сигнали, які передаються за допомогою поширюваних у просторі хвиль;
- допоміжні не хвильові (оптичні) об'єкти: лінзи, середовища зі змінною діелектричною проникністю;
- не хвильові сигнали – носії інформації;
- приймачі хвильових сигналів, що здійснюють перетворення хвильових сигналів, які передають їх у простір – оптичні об'єкти.

Для того щоб опорний хвильовий сигнал став носієм інформації необхідно, щоб його амплітуда або фаза були промодульовані.

Під час формування правил обробки сигналів розглядають такі операції, а саме: додавання (інтерференції) оптичних сигналів, алгебраїчного множення хвильових і нехвильових сигналів, згортання сигналів, а також операції перетворення Фур'є і перетворення Френеля [7].

Розрізняють просторову і часову інтерференції хвиль. Просторова інтерференція формується сигналами від щонайменше двох просторових джерел. Інтерференція в часі утворюється за рахунок ділення амплітуди, тобто коли формуються хвильові сигнали одним і тим самим джерелом, шляхом затримки одного сигналу відносно іншого сигналу.

Операцію множення в оптиці можна реалізувати, наприклад, шляхом пропускання хвильового сигналу  $s_0$  через діелектричне середовище із заданим показником заломлення  $n$ , що змінює амплітуду і швидкість оптичної хвилі.

Оцінка інформаційної структури оптичного сигналу визначає його інформаційну ємність, що є число ступенів свободи сигналу. З огляду на дуже велику інерційність вимірювальних приладів несучу частоту оптичного сигналу неможливо розгорнути в часі. У явному вигляді оптична синусоїда не спостерігається. Перенесення методів дискретизації та квантування сигналів, що застосовуються в оптоволоконних системах на оптичні сигнали необхідно

здійснювати з високою точністю [5].

Тим часом у теорії сигналів знайдено принцип, який дає змогу пристосувати традиційну теорію функцій для обслуговування інформаційних задач оптики – це принцип невизначеності сигналів. Зазначений принцип має як суто математичне, так і фізичне підґрунтя. Фізичне підґрунтя цього принципу таке – добуток смуги Фур'є  $\Delta f$  і часу випромінювання  $\Delta t$  сигналу підпорядковується нерівності (2.2):

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1. \quad (2.2)$$

Для хвильових оптичних сигналів  $\Delta t$  можна розглядати як невизначеність у визначенні тривалості часу хвильового процесу, а  $\Delta f$  як невизначеність у визначенні діапазону частот. Тому умову (2.2) іноді називають принципом невизначеності.

« Розглянемо застосування цього принципу для класу часових сигналів  $\{s(t)\}$ . Нехай клас сигналів характеризується загальною смугою пропускання  $\Delta F$  і загальним часом існування  $T$ . У площині змінної частоти  $f$  і часу  $t$  носій класу сигналів  $\{s(t)\}$  являє собою прямокутник зі сторонами  $T$  і  $\Delta F$ . Дійсно, тривалість досліду завжди обмежена, як обмежена і смуга частот. Тому на частотно-часовій площині розглядаються завжди процеси скінченної тривалості і скінченної смуги частот » [4].

Невизначеність в графічному розумінні означає, що умовну площину  $(f, t)$ , задану обмеженим носієм  $(T, \Delta F)$ , можна покрити скінченим числом елементарних комірок. Число елементарних комірок на площині і є числом ступенів свободи класу сигналів. Це показано на рисунку 2.5.

Існує кілька систем розбиття на елементарні комірки всієї області частотно-часової площини. Слід відмітити, що площини елементарних комірок мають дорівнювати константі й мають досягати мінімуму.

Розглянемо різні схеми розбиття носія класу сигналів на елементарні комірки. Як базовий вибирають сигнал, що реалізує елементарну комірку

$\Delta f \cdot \Delta t = 1$ . У радіотехніці цей випадок відповідає вибору як базового – простого сигналу. У цьому випадку область завдання функції оптичного сигналу в координатах  $(f, t)$  розбивається на квадратики. Число таких комірок (ступенів свободи)  $M_t$  на всьому носії задається співвідношенням (2.3):

$$M_t = 1 + \frac{\Delta F \cdot T}{\Delta f \cdot \Delta t} = 1 + \Delta F \cdot T \approx \Delta F \cdot T. \quad (2.3)$$

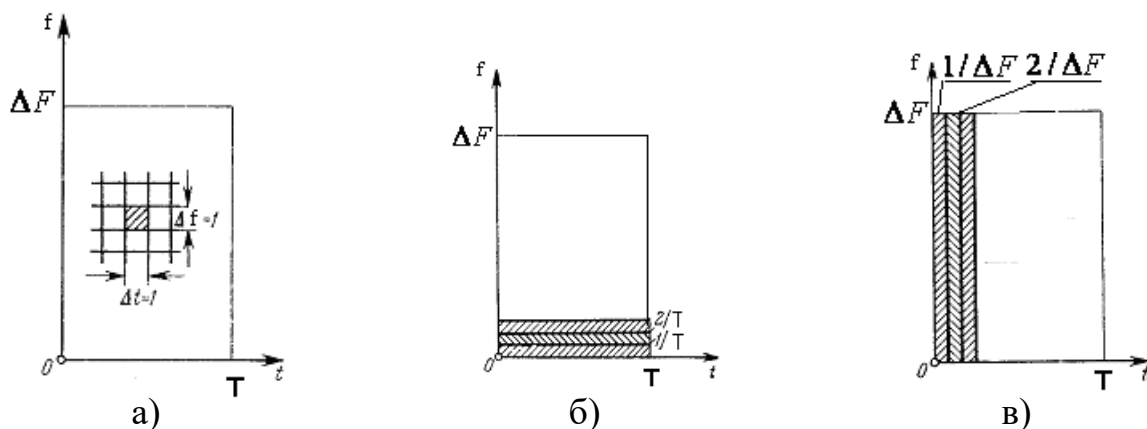


Рисунок 2.5 – Елементарні комірки сигналу в частотно-часовій області [1]

На рисунку 2.5, а показано розбиття на елементарні комірки згідно рівняння (2.2), на рисунку 2.5, б носій класу сигналів розбивається набором гармонійних коливань, що зображуються горизонтальними лініями. Тут міра дискретизації за частотою визначається співвідношенням  $\Delta f = 1/T$ . З іншого боку, випадок на рисунку 2.5, в відповідає розбиттю носія сигналів типу дельта-функціями, які мають обмежену епоху в часі, але містять усі частоти. Ці сигнали зображуються набором вертикальних ліній. Тут міра дискретизації за часом визначена співвідношенням  $\Delta t = 1/\Delta F$ .

Сигнал синусоїди  $s(t)$  є найпростішим і має кінцеву тривалість, тобто частоту синусоїди не можна визначити абсолютно точно, оскільки на дану синусоїду відгукнуться відразу кілька резонаторів. Це – добре перевірений експериментальний факт, що відображає принцип невизначеності.

Для комплекснозначних функцій вводять додатковий множник 2, що збільшує ступінь свободи сигналу вдвічі:

$$M_t = 2\Delta F \cdot T. \quad (2.4)$$

Нехай носій просторового сигналу є плоским оптичним. дорівнює  $X \cdot Y$ , де  $X, Y$  – відповідно розміри сигналів за координатами  $(x, y)$ .

Для оптичного сигналу елемент роздільної здатності за координатою  $x$  дорівнює:

$$\Delta k = 1/U_k = \lambda_k/2, \quad k = x, y, \quad (2.5)$$

де  $U_k$  – просторові смуги сигналу;

$\lambda_k$  – довжина хвилі, що відповідає верхній просторовій частоті  $0,5U_k$ .

Таким чином, площина сигналу і його просторового спектра (рис. 2.6), обмежені прямокутними апертурами  $XY$  ( $U_x U_y$ ) і розбиті сітками  $\Delta x \Delta y$  ( $\Delta u_x \Delta u_y$ ). У вузлах цих сіток задано відліки поля:

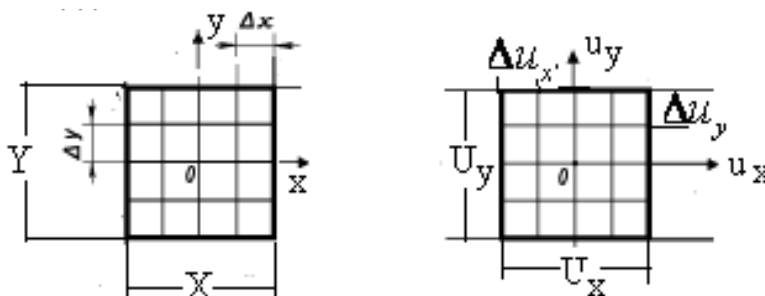


Рисунок 2.6 – Дискретизація плоского оптичного сигналу і його спектру [1]

З принципу невизначеності випливає, що число незалежних відліків оптичного сигналу за просторовими змінними дорівнює:

$$M_{xy} = \frac{X}{\Delta x} \cdot \frac{Y}{\Delta y} + 1 = \frac{2X}{\lambda_x} \cdot \frac{2Y}{\lambda_y} + 1 \approx \frac{2X}{\lambda_x} \cdot \frac{2Y}{\lambda_y}, \quad (2.6)$$

де  $\Delta X, \Delta Y$  – просторові розміри оптичного сигналу.

З іншої сторони число незалежних відліків оптичного сигналу дорівнює:

$$M_{xy} = X \cdot Y \cdot U_x \cdot U_y. \quad (2.7)$$

Тоді загальне число ступенів свободи оптичного сигналу по просторово-часовим змінним дорівнює:

$$M_{\Sigma} = 2M_{xy}M_t. \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.8) є фундаментальним інваріантом, що характеризує інформаційну ємність оптичних сигналів. У межах загального числа ступенів свободи  $M_{\Sigma}$  можна збільшувати, наприклад, число ступенів свободи в просторі, але тільки за рахунок зменшення роздільної здатності в часі або навпаки.

Інформаційна ємність оптичних сигналів описується сигналом  $s(x, y)$  та набором його вибіркового значень, тобто дискретної сукупності точок на площині. Для дискретизації оптичних сигналів використаємо теорему Котельникова.

За визначенням дискретизація оптичного сигналу зводиться до множення сигналу на двовимірну  $\Gamma$ -функцію:

$$s(x, y) = \Gamma\left(\frac{x}{\Delta x}\right) \Gamma\left(\frac{y}{\Delta y}\right), \quad (2.9)$$

де  $\Gamma(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - n)$  – гребінчаста функція;

$\Delta x, \Delta y$  – кроки дискретизації по координатах  $x, y$ .

Таким чином, вибіркова функція (2.9) складається з низки  $\delta$ -функцій, розташованих на відстані  $\Delta x$  у напрямі  $x$  і  $\Delta y$  за координатою  $y$ . Слід відмітити, що в оптиці замість просторової частоти часто розглядають іншу зворотну величину – довжину хвилі. Теорема Котельникова означає, що, маючи

розташований відповідним чином прямокутний ряд вибірових значень функції з обмеженою шириною спектра, можна здійснити точне її відновлення [7].

Як відомо, в оптичному волокні світло поширюється з іншою швидкістю, ніж у вакуумі. Показник заломлення кварцового скла  $n \approx 1,47$ , отже, світлове випромінювання поширюється в кварці майже в півтора раза повільніше, ніж у вакуумі. В оптичних волокнах швидкість, з якою електромагнітна хвиля поширюється із точки А в точку В, приблизно така сама, як у мідній витій парі ( $2 \cdot 10^8$  м/с).

Розрізнімо поняття швидкості поширення сигналу та пропускною здатністю. Пропускна здатність залежить від несучої частоти і частоти, з якою подаються цифрові сигнали. В оптиці ці величини на порядки вищі, ніж у витій парі, тому пропускна спроможність оптичного волокна істотно більша, особливо для одномодового волокна класу OS2 під час широкосмугового передавання в діапазоні, який об'єднує одномодові вікна прозорості, що в кінцевому варіанті збільшує пропускну спроможність по одноволоконному каналу.

### **2.3 Методи ущільнення та кодування інформаційних потоків**

Існує кілька способів збільшення пропускної здатності систем передачі інформації. Більшість із них зводиться до одного з методів ущільнення (мультиплексування) компонентних інформаційних в один груповий, який передається по лінії ВОСП. Для подальшого збільшення інформаційної ємності систем передачі широко застосовується поєднання одночасно двох або більше методів. Стосовно до волоконно-оптичних систем, то методи ущільнення групових інформаційних потоків розділити на два типи: електронне та оптичне ущільнення.

Сьогодні метод часового ущільнення інформаційних потоків (TDM – Time Division Multiplexing) є найбільш ефективним і поширеним та застосовується при передачі інформації в цифровому вигляді. Суть його

полягає в тому, що процес передачі розбивається на низку часових циклів, кожний з яких у свою чергу розбивається на  $N$  субциклів, де  $N$  – число ущільнених потоків або каналів. Кожен субцикл підрозділяється на часові інтервали, протягом яких передається частина інформації одного з цифрових ущільнених потоків. Крім цього, деяке число позицій відводиться для ідентифікації, вставок і цифрового потоку зв'язку [9].

При частотному методі ущільнення (FDM – Frequency Division Multiplexing) кожен інформаційний потік передається по фізичному каналі на відповідній піднесучій частоті  $f_{\text{пн}}$ . Якщо як фізичний канал виступає оптичне випромінювання – оптична несуча, то вона модулюється за інтенсивністю груповим інформаційним сигналом, спектр якого складається з низки піднесучих частот, кількість яких дорівнює числу компонентних інформаційних потоків. Частота піднесучої кожного каналу вибирається в 10 разів вищою, ніж верхня частота спектра інформаційного потоку.

« Для зменшення перехресних завад під час модуляції оптичного випромінювання груповим сигналом передавальна характеристика електронного пристрою частотного ущільнення і ват-амперна характеристика лазера повинні мати підвищену лінійність у широкому діапазоні рівнів. При цьому коефіцієнт модуляції оптичного випромінювання залежить від кількості ущільнених каналів і зазвичай не перевищує 10% » [3].

На приймальній стороні оптична несуча потрапляє на фотодетектор на навантаженні якого виділяється електричний груповий потік, що надходить після підсилення в широкосмуговому підсилювачі прийому надходить на входи вузькосмугових фільтрів, центральна частота пропускання яких дорівнює одній із піднесучих частот. Як компонентні потоки можуть виступати як цифрові, так і аналогові сигнали.

У системах передачі, заснованих на використанні багатомодового оптичного волокна, знаходиться застосування так зване модове ущільнення (Mode Division Multiplexing) [5]. Цей метод ущільнення полягає в поширенні оптичного випромінювання в оптичному волокні з точки зору геометричної

оптики. Відповідно з цим, якщо на вхідний торець багатомодового волокна під кутом  $\theta_1 < \theta_k$  падає оптичний промінь, то увійшовши через цей торець у волокно і поширюючись там за строго визначеною для нього траєкторією, він виходить із вихідного торця під таким же кутом. Це справедливо і для інших променів, що вводяться в ОВ кожен під своїм кутом.

Застосовуючи модові селектори на вході і виході волокна, можна здійснювати передачу незалежних інформаційних потоків на відповідних модах, які в цьому разі відіграють роль каналів. Модове ущільнення може працювати тільки у випадку відсутності перемішування або взаємного перетворення мод. Ця умова може бути виконана для таких багатомодових ОВ, у яких повністю виключається наявність локальних неоднорідностей, зокрема вигинів. Зазвичай метод модового ущільнення застосовується в деяких системах автоматики, в яких інформація передається на невеликі відстані порядку одиниць – десятків метрів.

Ущільнення потоків інформації за допомогою оптичних несучих, що мають лінійну поляризацію, називається ущільненням за поляризацією (PDM – Polarization Division Multiplexing). При цьому площина поляризації кожної несучої має бути розташована під своїм кутом.

Мультиплексування здійснюється за допомогою спеціальних оптичних призм, наприклад, призми Рошона. Цей метод аналогічний модовому ущільненню, хоча як середовище передачі групового потоку може бути використано одномодове волокно. Однак, як і для MDM-ущільнення, поляризаційне ущільнення може працювати тільки тоді, коли в оптоволокні відсутня оптична анізотропія, тобто воно не повинно мати локальних неоднорідностей і вигинів. Це одна з причин досить обмеженого застосування цього методу ущільнення. Зокрема, він застосовується в оптичних ізоляторах, а також в оптичних волоконних підсилювачах.

Поява і розвиток нових видів послуг зв'язку вимагає не тільки збільшення інформаційної ємності систем, але все частіше збільшення швидкості передачі. Очевидно, що застосування таких видів ущільнення каналів як частотне або

багатомодове, дають змогу збільшувати об'єм передаваної інформації [10].

Для передачі інформації про швидкопротікаючі процеси у реальному масштабі часу необхідні лінії з високою швидкістю передачі. Для цього служать системи з оптичним часовим ущільненням зі швидкістю передачі (OTDM – Optical Time Division Multiplexing) до 40 Гбіт/сек.

Для реалізації цього методу ущільнення використовують схему, показану на рисунку 2.7. Лазер з синхронізацією мод синхронізується від еталонного таймера мультиплексуєчих електронних систем SDH. Тут потік оптичних імпульсів з тривалістю  $t$  і періодом слідування  $T$  через оптичний підсилювач 2 подається на оптичний розгалужувач 3, що просторово розділяє світловий потік на вісім рівних частин, кожна з яких поступає на оптичні модулятори 4...8. З виходу кожного з модуляторів випромінювання проходить через відповідні відрізки оптичних волокон, що грають роль оптичних ліній затримки. При цьому час затримки з виходу першого модулятора 4 вибирається дуже малим (близьким до нуля).

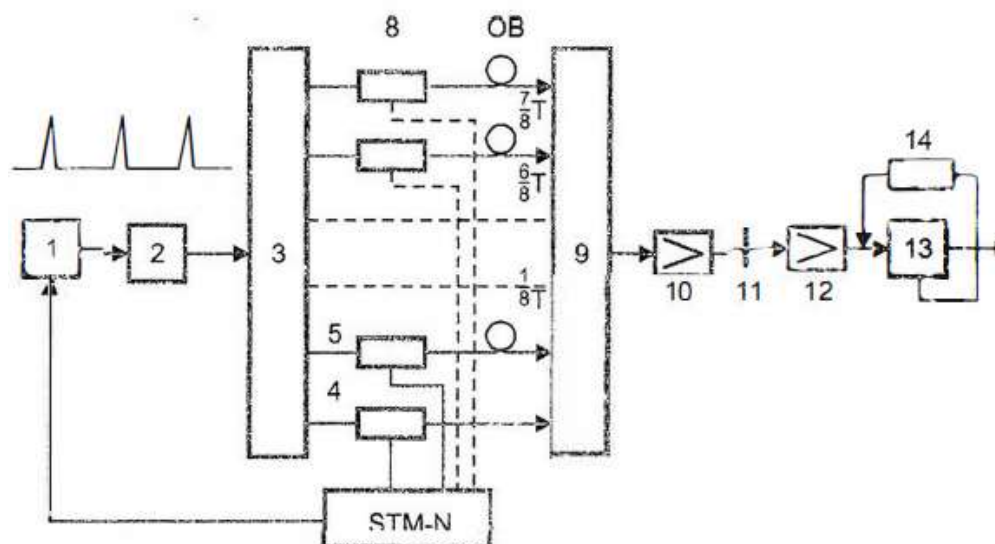


Рисунок 2.7 – Схема реалізації методу OTDM [10]

Після виходу 2-го модулятора 5 оптичні імпульси по черзі затримуються на  $1/8 T$ . Після цього з виходу модуляторів потоки надходять на входи суматора 9, з виходу якого об'єднаний груповий потік після підсилення в оптичному

підсилювачі 10 подається в лінію в оптичний кабель.

Таким чином, в описаній системі методом оптичного часового ущільнення (OTDM) передається вісім цифрових інформаційних потоків по 10 Гбіт/с. Система призначена для передачі по оптичним волокнам у діапазоні довжин хвиль 1530...1560 нм. У системі використано повністю оптичні елементи – лазер, оптичні розгалужувачі, модулятори, оптичні підсилювачі та оптичні лінії затримки. Це повністю вкладається в перспективну концепцію створення повністю оптичних мереж і систем передачі.

Оптичне волокно, а також оптоелектронні компоненти фотоприймача і оптичного передавача накладають обмеження на властивості переданого цифрового сигналу. Тому інформація, що передається по ВС, повинна бути відповідним чином закодована.

На вибір коду впливають такі причини:

- нелінійність модуляційної характеристики і температурна залежність випромінюваної оптичної потужності лазера (кодований сигнал може бути багаторівневим);
- код не повинен мати будь-яких обмежень на передаване повідомлення і забезпечувати однозначну передачу будь-якої послідовності нулів і одиниць;
- в енергетичному спектрі сигналу вміст інформації про тактовий синхросигнал повинен бути мінімальним;
- код повинен забезпечувати можливість виявлення помилок.

Щоб розрізнити біти інформаційного сигналу в приймачі, необхідно, щоб приймач і передавач були синхронізовані. Для цього разом з інформаційним сигналом по лінії повинна передаватися інформація про тактову частоту. Здійснити синхронізацію тим простіше, чим більше число переходів логічного рівня в цифровому сигналі.

Найкращим з точки зору відновлення тактової частоти та простоти реалізації схеми виділення синхронізуючої інформації є сигнал, що має в енергетичному спектрі дискретну складову на тактовій частоті.

Одним із прикладів такого коду є RZ-код (Return to zero). Це трирівневий

код, що забезпечує повернення до нульового рівня після передачі кожного біта інформації. Логічному нулю відповідає додатний імпульс, логічній одиниці – від’ємний.

На рисунку 2.8 показано логіку трирівневого коду типу RZ та дворівневого NRZ.

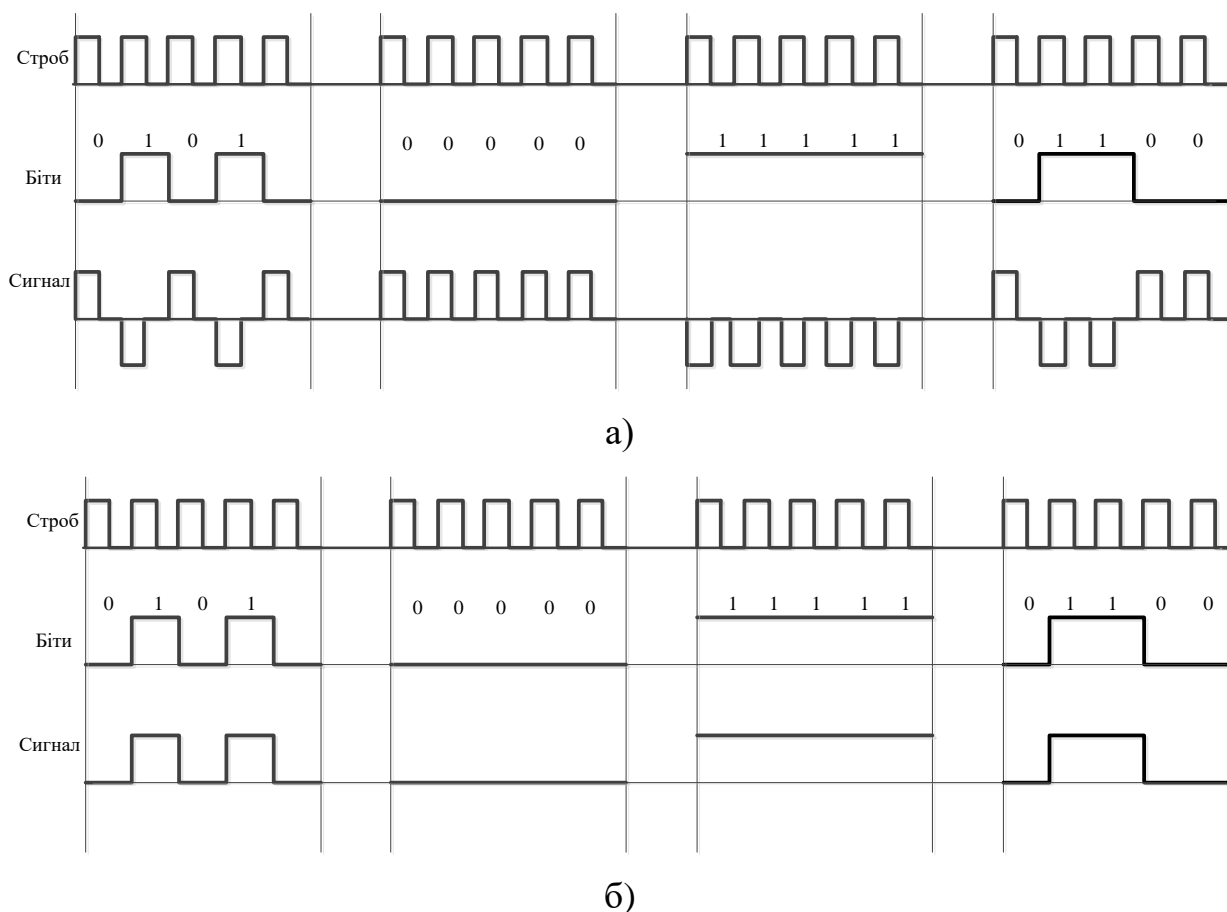


Рисунок 2.8 – Трирівневий код RZ (а) та дворівневий NRZ (б) [9]

Інформаційний перехід здійснюється на початку біта, повернення до нульового рівня – в середині біта. Особливістю коду RZ є те, що в центрі біта завжди є перехід (додатний або від’ємний). Приймач може виділити синхроімпульс (строб), що має частоту проходження імпульсів, з самого сигналу. Прив’язка проводиться до кожного біта, що забезпечує синхронізацію приймача з передавачем. Такі коди, що несуть в собі строб, називаються самосинхронізуючими.

Недолік коду RZ полягає в тому, що він не дає виграшу в швидкості

передачі даних. Для передачі зі швидкістю 10 Мбіт/с потрібна несуча частота на рівні 10 МГц. Крім того, для розрізнення трьох рівнів необхідне краще співвідношення сигнал/шум на вході в приймач, ніж для дворівневих кодів.

« Код NRZ (Non Return to Zero) – без повернення до нуля – це найпростіший дворівневий код. Нулю відповідає нижній рівень, одиниці – верхній. Інформаційні переходи відбуваються на межі бітів. Перевага коду – простота. Сигнал не потрібно кодувати і декодувати. Швидкість передачі даних і частота зміни сигналу не однакові. При передачі послідовності однакових бітів частота зміни сигналу дорівнює нулю. Найбільша частота відповідає послідовності чергування нулів і одиниць » [7].

Код NRZ не має синхронізації. Це є найбільшим його недоліком. Якщо тактова частота приймача відрізняється від частоти передавача, синхронізація зникає, біти перетворюються і дані втрачаються.

Тому код NRZ використовується тільки для передачі короткими пакетами (зазвичай до 1 Кбіт). Для синхронізації початку прийому пакета використовується стартовий біт, рівень якого відрізняється від пасивного стану лінії зв'язку (наприклад, пасивний стан лінії при відсутності передачі – 0, стартовий біт – 1).

Найбільшого поширення в локальних мережах набув Манчестер-II (рис. 2.9). Два рівні сигналу і самосинхронізація забезпечують йому кращу захищеність від перешкод.

Логічному нулю відповідає перехід на верхній рівень в центрі бітового інтервалу, логічній одиниці – перехід на нижній рівень. Логіку кодування добре видно на прикладі передачі послідовності чергуючих логічних одиниць і нулів. Зміна сигналу в центрі кожного біта дозволяє легко виділити синхросигнал. При передачі чергування бітів частоти слідування сигналів зменшується в два рази.

Переходи в середині інформаційного біта залишаються, а граничні (на межі бітових інтервалів) відсутні. Імпульси тактової частоти синхронізуються з інформаційними імпульсами і забезпечують заборону небажаних переходів.

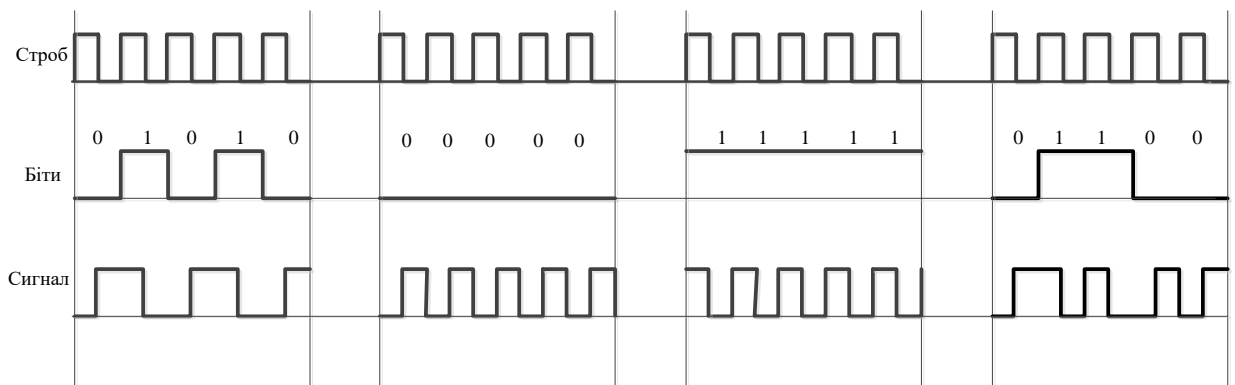


Рисунок 2.9 – Дворівневий код Манчестер-II

Самосинхронізація дає можливість передачі великих пакетів інформації без втрат через відмінності тактової частоти передавача і приймача. Велика перевага манчестерського коду – відсутність постійної складової при передачі довгої послідовності одиниць і нулів. Завдяки цьому гальванічна розв'язка сигналів виконується найпростішими способами, наприклад, за допомогою імпульсних трансформаторів.

Частотний спектр сигналу при манчестерському кодуванні включає в себе тільки дві частоти: при швидкості передачі 10 Мбіт/с – це 10 МГц (відповідає передаваному ланцюжку з одних нулів або з одних одиниць) і 5 МГц (відповідає послідовності з чергуванням нулів і одиниць: 101010...). Тому за допомогою смугових фільтрів можна легко відфільтрувати всі інші частоти (перешкоди, наведення, шуми).

« Код Манчестер-II знайшов застосування в оптоволоконних і електропровідних мережах. Найпоширеніший протокол локальних мереж Ethernet використовує саме такий код. Розглянуті вище схеми кодування сигналів були бітовими. При бітовому кодуванні кожному біту відповідає певний рівень сигналу » [9].

Код РАМ 5 (рис. 2.10) є п'ятирівневим кодом і в ньому використовується 5 рівнів амплітуди і двобітове кодування. Для кожної комбінації задається рівень напруги. При двобітовому кодуванні для передачі інформації необхідно чотири рівні (два в другому ступені 00, 01, 10, 11).

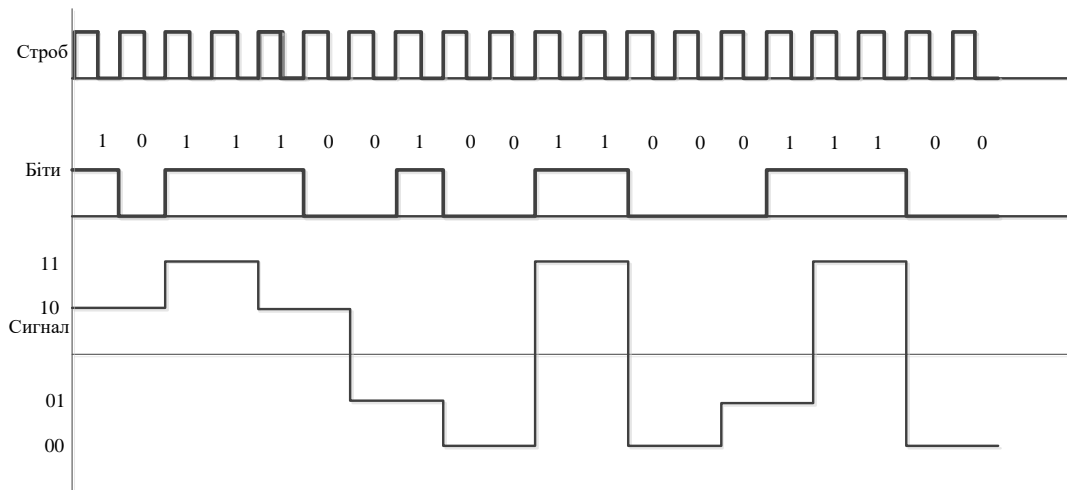


Рисунок 2.10 – П'ятирівневий код РАМ 5

Передача двох бітів одночасно забезпечує зменшення в два рази частоти зміни сигналу. П'ятий рівень доданий для створення надмірності коду і призначений для виправлення помилок. Це дає додатковий резерв співвідношення сигнал/шум, що дорівнює 6 дБ.

## 2.4 Вплив фізичних факторів на функціональні можливості ВОСП

Довжина регенераційної ділянки і швидкість передачі оптичних сигналів є чутливими до поляризаційно-модової дисперсії (ПМД), що викликана нециркулярністю серцевини одномодового волокна та появи двох різних показників заломлення для основних станів поляризації. Це призводить до появи різних швидкостей розповсюдження мод, що в кінцевому варіанті затримує сигнал на приймальній стороні.

Тобто, спектральні та модові компоненти світлого сигналу поширюються на різних швидкостях, як призводить до спотворення сигналу. Дисперсія визначає важливу характеристику оптичного волокна, а саме широкосмуговий зв'язок, який відповідає за кількість переданої інформації та відстань передачі.

$$\tau = \sqrt{L} \cdot D < 0,1T, \quad (2.10)$$

де  $\tau$  – диференціальна групова затримка;

$D$  – поляризаційно-модовий показник волокна;

$L$  – довжина волокна;

$T$  – тривалість біту.

Максимальна швидкість передачі (біт/сек) при цьому гіперболічно залежить від довжини волокна та пропорційно бітовому інтервалу  $t$ :

$$V_{max} = \frac{t \cdot \sqrt{L}}{D}. \quad (2.11)$$

На рисунку 2.11 показано залежність  $V_{max} = f(\tau)$  для різних довжин волокна.

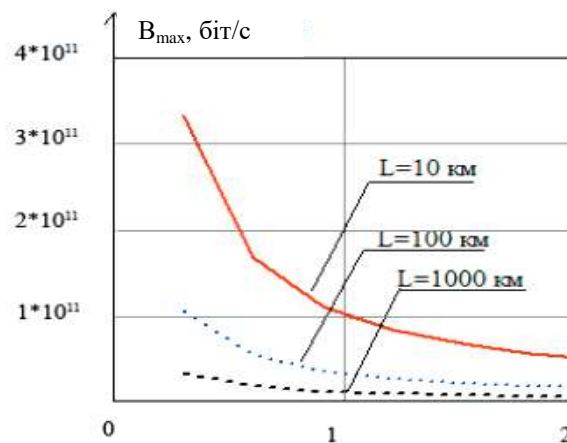


Рисунок 2.11 – Залежність  $V_{max} = f(\tau)$  для різних довжин волокна

Як видно з рисунка 2.11 при меншій протяжності оптоволоконної лінії спостерігається вища швидкість передачі в межах терабітного діапазону. Мінімізація затримки різними способами також збільшує швидкість передачі сигналів.

Наступним негативним фактором, що обмежує швидкості передачі є наявність оптичних нелінійностей у волокні. Ці спотворення виникають і виникають із-за несуттєвих змін показника заломлення в залежності від

оптичної потужності передаваного сигналу. Чим більша потужність, тим різкіше проявляється вплив нелінійностей, що в свою чергу збільшує втрати і тим самим знижує якість передачі [12].

На рисунку 2.12 показано зміну показника заломлення від оптичної потужності сигналу  $n = f(P_0)$ .

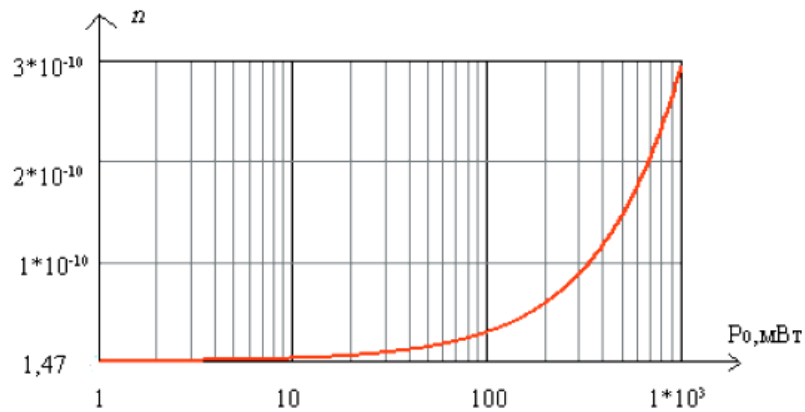


Рисунок 2.12 – Залежність  $n = f(P_0)$  [12]

Розглянемо способи мінімізації поляризаційно-модової дисперсії, яка виникає в системах передач на далекі відстані на швидкостях близько 50 Гбіт/сек. Для цього застосовують динамічну компенсацію, що базується на петлі зворотнього зв'язку. Пристрій, що вимірює дисперсію подає сигнал на керуючий процесор, а потім на пристрій компенсації. Ця компенсація може застосовуватись як для хроматичної так і поляризаційної дисперсій, як для одного каналу так і декількох.

На рисунку 2.13 показано схему динамічної компенсації дисперсії.

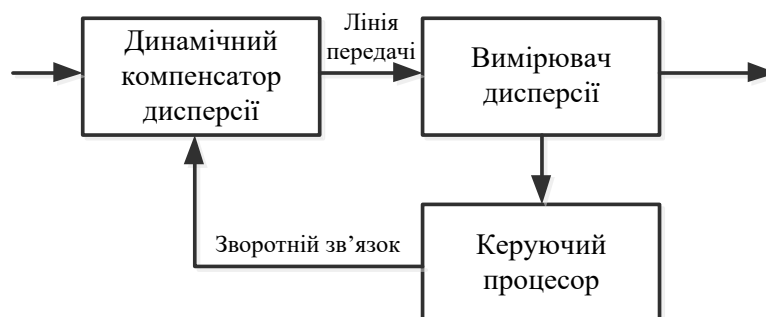


Рисунок 2.13 – Схема динамічної компенсації дисперсії [12]

Іншим способом є виготовлення високоякісного оптичного волокна з низьким ступенем еліптичності зі слабким зв'язком мод. Але цим мають займатись заводи-виробники. Недоліком цього є те, що прокладений оптичний кабель піддається механічним напруженням та згинам, що може викликати його пошкодження.

## **2.5 Способи підвищення якості передачі сигналів та пропускної здатності ВОСП**

Сьогодні телекомунікаційні системи дозволяють створювати цифрові системи передачі інформації різних типів – передачу аудіо, відео та даних у різних формах. З точки зору розробки ТКС, волоконно-оптичні системи передачі є перспективним рішенням для передачі всіх видів трафіку.

Як наслідок, для подальшого підвищення продуктивності важливим є розробка архітектури основи функціонування пристроїв, матеріалів та технологій для виробництва волоконно-оптичних систем передачі інформації.

Одним із методів переходу на наступний рівень якості та швидкості передачі вважається розробка пристроїв обробки та передачі з підтримкою молекулярної електроніки; введення окремих молекул органічних сполук як елементарної бази.

Усі можливі конфігурації молекул забезпечують необмежений діапазон для кодування всіх станів елементарних частинок та інформаційних повідомлень у них.

Збільшення пропускної здатності волоконно-оптичних ліній зв'язку є одним з ключових завдань в умовах зростання трафіку та потреби в швидших та надійніших з'єднаннях. З розвитком цифрових технологій та збільшенням кількості користувачів Інтернету зростає навантаження на існуючу інфраструктуру, що вимагає модернізації та оптимізації мереж.

Розглянемо технології для збільшення пропускної здатності та узагальнимо переваги й недоліки їх у вигляді таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технології розширення пропускної здатності [4]

Технологія	Особливості	Переваги	Недоліки
WDM	Передача кілька сигналів по одному оптичному волокну на різних довжинах хвиль	Збільшена пропускна здатність без заміни кабелю, гнучкість в управлінні трафіком	Висока вартість обладнання та складність налаштування
DWDM	Використання до 80 або більше каналів на одному волокні. Метод актуальний для магістральних мереж та мереж з високою щільністю трафіку	Максимальна ефективність використання оптичного волокна, підтримка великих обсягів даних.	Потреба складного та дорогого обладнання.
CWDM	Спрощена версія WDM, яка використовує менше каналів з більшою відстанню між довжинами хвиль	Зниження вартості порівняно з DWDM, простота впровадження	Нижча пропускна здатність порівняно з DWDM

Ефективна маршрутизація та оптимальний розподіл трафіку можуть значно розвантажити мережу та покращити її продуктивність. Використання сучасних маршрутизаторів та систем управління трафіком допомагає досягти цих цілей. Впровадження технологій 5G відкриває нові можливості для збільшення пропускної здатності мережі, особливо в умовах високої щільності користувачів та пристроїв. Оптичні мережі відіграють ключову роль у підтримці інфраструктури 5G, забезпечуючи необхідну пропускну здатність та швидкість передачі даних.

CWDM використовує оптичний мультиплексор для мультиплексування оптичних сигналів різної довжини хвилі в одне волокно для гібридної передачі, причому кожен кольоровий оптичний канал фізично ізольований один від одного, тим самим реалізуючи мультиплексування оптичних волоконно-оптичних каналів. Мультиплексування може бути розширене для використання в кількох сценаріях, таких як зворотний зв'язок BBU, зворотний зв'язок OLT та доступ до інтегрованих послуг сегмента доступу [10].

У цьому рішенні службові сигнали різної довжини хвилі надаються за допомогою узгоджених оптичних модулів на BBU та RRU (радіопристрої

віддаленого блоку). Оптичні волокна, що передають службові сигнали відповідних довжин хвиль, відповідно підключені до оптоволоконних подовжувачів з боку BBU та з боку RRU (радіодистанційного блоку). Оптоволоконні подовжувачі з обох боків передають сигнали різних довжин хвиль через одне волокно з боку лінії, що значно економить ресурси.

Система є пасивним рішенням з водонепроникністю, пилонепроникністю, стійкістю до високих та низьких температур та високою надійністю. Немає потреби в джерелі живлення, а пристрій має невеликі розміри, простий в установці та використанні. Пристрій не потребує великих витрат та спеціальних місць для монтажу та може забезпечити доставку сигналу без змін та підтримку найкращої якості між BBU та RRU (радіодистанційним блоком).

На рисунку 2.14 показано структуру при передачі оптичних сигналів.

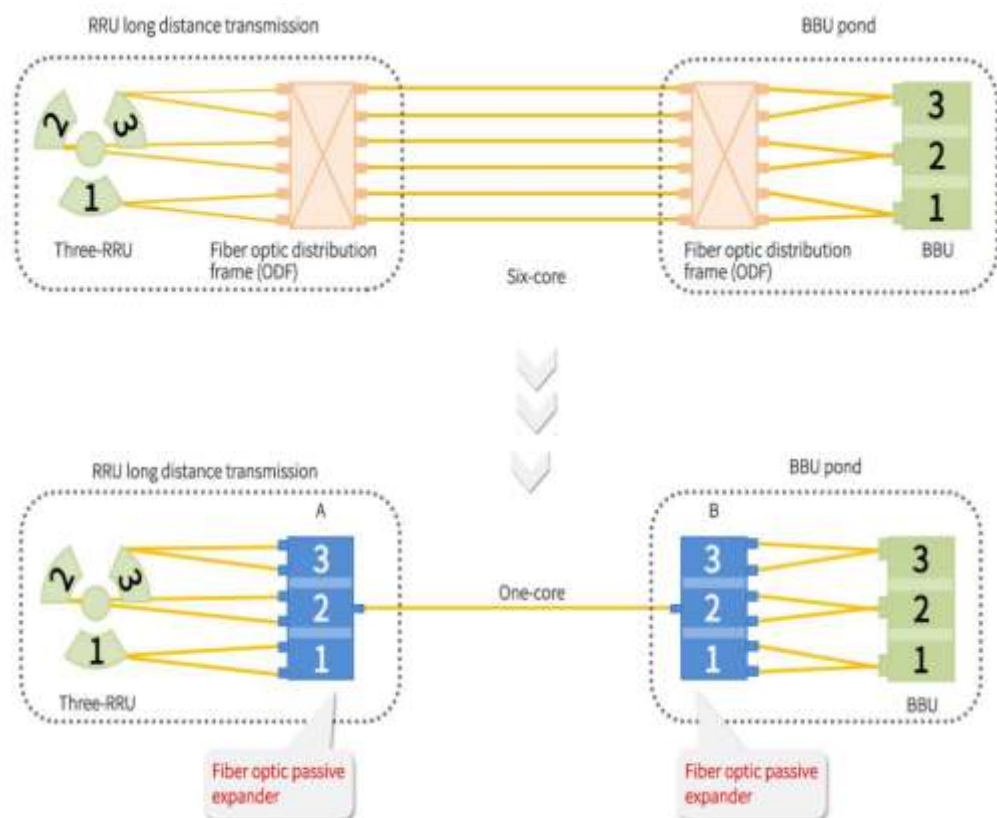


Рисунок 2.14 – Структура при передачі оптичних сигналів [10]

Цей метод є дуже ефективним та економічним і може застосовуватися на відстані від станції до RRU (радіодистанційного вузла).

Таким чином, для збільшення пропускної здатності волоконно-оптичних ліній залежно від економічних та технічних умов діючих підприємств, а також від кількості споживачів зв'язку та багатьох подібних факторів, усі вищезазначені методи, що забезпечують збільшення пропускної здатності волоконно-оптичних ліній зв'язку, можуть бути застосовані на необхідних об'єктах та в необхідних районах. Наразі на багатьох об'єктах обладнання працює на раніше побудованих волоконно-оптичних лініях, де всі волокна волоконно-оптичної лінії вже використані і немає можливості прокладання нової волоконно-оптичної лінії зв'язку, а потрібне розширення за рахунок існуючих волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Потреба у вищих швидкостях передачі даних та експоненціальне зростання інтернет-трафіку поставили волоконно-оптичні мережі на передній план розвитку телекомунікаційної інфраструктури. Оскільки споживання цифрових даних продовжує зростати, зумовлене хмарними обчисленнями, потоковими сервісами та постійно зростаючою кількістю підключених пристроїв, завдання масштабування мережевої ємності для задоволення цього попиту стає дедалі актуальнішим [12, 13].

Прагнення до збільшення ємності волоконно-оптичних мереж вимагає багатогранного підходу, який включає досягнення в технологіях фізичного рівня, оптимізацію архітектури мережі та інноваційні схеми модуляції. В основі цих зусиль лежить мета максимізації обсягу даних, які можна передати по одному волокну, тим самим знижуючи вартість за біт та підвищуючи ефективність мережевих ресурсів. Це передбачає не лише більш ефективне використання існуючої інфраструктури, але й впровадження нових сучасних телекомунікаційних технологій.

Вирішення проблеми ефективного використання оптоволокна у волоконно-оптичних лініях зв'язку можливе при використанні одного волокна замість двох за допомогою Y-роздільників, що буде розглянуто у четвертому розділі кваліфікаційної роботи.

## РОЗДІЛ 3

### ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Випробування волоконно-оптичного кабелю

Волоконно-оптичні кабелі, як і будь-який інший тип кабелю, потребують випробувань, щоб переконатися, що вони відповідають застосованому рівню продуктивності для застосування, в якому вони будуть використовуватися. Ці випробування, як правило, легко виконати, проте деякі випробування вимагають спеціалізованого випробувального обладнання. Крім того, для вимірювання параметрів кабелю використаємо різні методи та прилади [11].

Існує три основні тести, які зазвичай використовуються для перевірки волоконно-оптичного кабелю. Ці тести варіюються від дуже простих до дуже складних. У порядку від найпростіших до найскладніших, поширені тести, що проводяться для волоконно-оптичного кабелю:

- тест «Ліхтарик»;
- випробування на затухання (втрати);
- випробування оптичного рефлектометра в часовій області.

Перший тест є найпростішим можливим тестом для збірки оптоволоконного кабелю. Він просто перевіряє, чи кабель передаватиме світло від одного кінця до іншого. Він не показує, скільки світла втрачається в кабелі, а також не виявляє, де в кабелі знаходиться будь-який дефект.

Щоб виконати тест, слід від'єднати обидва кінці кабелю від будь-якого обладнання та посвітити променем ліхтарика, як показано на рисунку 3.1, використовуючи вимірювач зі світловим променем або іншим джерелом видимого світла на одному кінці. На іншому кінці кабелю подивитись на роз'єм. Якщо кабель здатний проводити світло, буде видно маленьку точку світла в центрі роз'єму. Якщо центр роз'єму темний, то у кабелі є обрив.

Цей тест є доволі простим, проте він виявляє близько 90% типів несправностей, які призводять до несправності волоконно-оптичних ліній. Крім того, оскільки для його проведення не потрібне спеціальне обладнання, він

дозволяє швидко провести тест у ситуаціях, коли більш складне тестування було б важко або неможливо виконати [7].



Рисунок 3.1 – Вимірювач оптичної потужності з ліхтариком [7]

Другий тест на затухання точно показує, скільки світла втрачається всередині вузла кабелю. Для нього потрібне використання джерела світла та вимірювача оптичної потужності, а також еталонного кабелю. Випробування на затухання звуку полягає в тому, щоб пропустити світло відомої інтенсивності на один кінець кабелю та точно виміряти, скільки світла виходить на іншому кінці. Різниця полягає у втратах або затуханні в кабелі.

Точна процедура тестування дещо відрізнятиметься залежно від конкретної марки та моделі використовуваного випробувального обладнання. Використовуючи пару коротких кабелів із відомим значенням затухання («опорні кабелі»), з'єднаних разом за допомогою волоконно-оптичного з'єднувача, вимірювач оптичної потужності підключається до джерела світла (рис. 3.2). Далі зчитується рівень потужності, зазначений на вимірювачі оптичної потужності [9]. Це число є нашим базовим рівнем передачі.

Деякі вимірювачі оптичної потужності мають функцію «автоматичного обнулення», яка калібрує вимірювач оптичної потужності відповідно до комбінації джерела світла та опорного кабелю. Ця функція встановлює нульове значення («0») для комбінації опорного кабелю та рівня пропускання джерела

світла. В результаті на дисплеї вимірювача оптичної потужності відобразяться фактичні втрати в кабелі, що тестується, без необхідності вручну компенсувати втрати в рівні передачі та опорному кабелі. Це призводить до швидшого тестування з меншою ймовірністю помилок, і цю функцію слід використовувати завжди, коли вона доступна.

Далі слід від'єднати з'єднувач і вставити кабель, який потрібно перевірити, між двома опорними кабелями і зчитати показники на вимірювачі оптичної потужності. Потім віднімається рівень передачі, визначений на другому кроці, від показників вимірювача оптичної потужності. Це число і є затушенням кабелю. Якщо тест виконується за допомогою вимірювача оптичної потужності, каліброваного з функцією «Автоматичне обнулення», то слід проігнорувати цей крок. У такому випадку на дисплеї вимірювача оптичної потужності буде відобразитися втрата кабелю. Це показано на рисунку 3.3.

Приклад вимірювань: результат другого кроку – -0,6 дБм, результат шостого кроку -2,9 дБм.  $-2,9 - (-0,6) = -2,9 + 0,6 = -2,3$  дБ. Тобто, кабель має втрати 2,3 дБ.

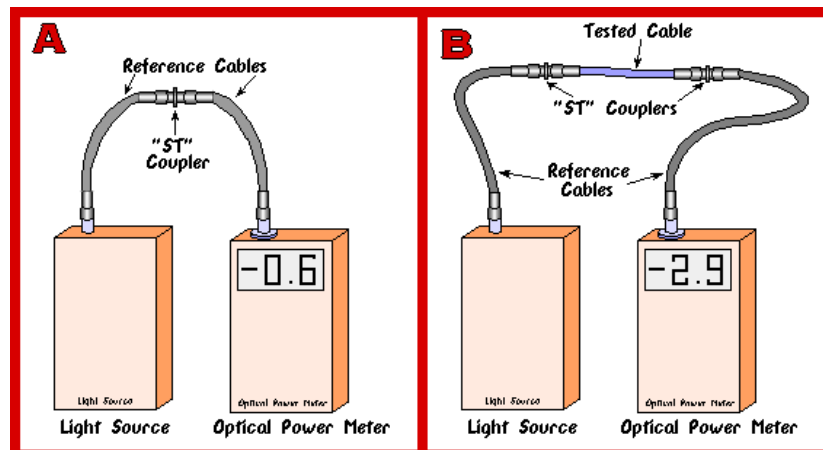


Рисунок 3.2 – Випробування на затушення без автоматичного обнулення [9]

Результати тесту на затушення можуть бути корисними для усунення несправностей пари волоконно-оптичних пристроїв, які не здійснюють зв'язок, але волокно проходить тест «спалах». Кожен волоконно-оптичний пристрій зазвичай містить у своїй інструкції з експлуатації рівень передачі та

мінімальний рівень прийому, який він може прийняти. Якщо взяти рівень передачі пристрою на одному кінці кабелю та відняти від нього втрати, що виникають через довжину кабелю, то отримаємо рівень сигналу, що подається на приймач.

Цей рівень має бути більшим або рівним чутливості приймача підключеного пристрою. Якщо він менший, то обладнання не зможе з'єднатися.

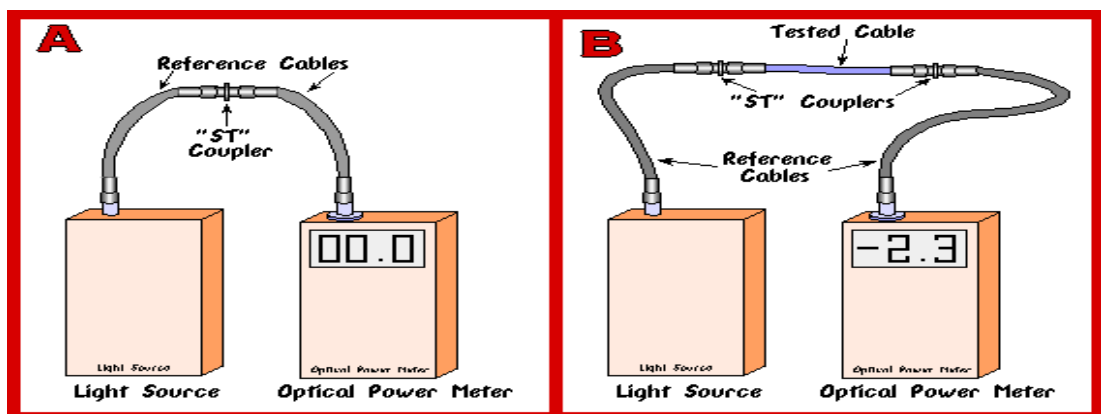


Рисунок 3.3 – Випробування на затування з автоматичним обнуленням

Припустимо, що у нас є пара оптоволоконних модемів, розділених оптоволоконним кабелем. В інструкції до модемів, наприклад, зазначено, що рівень передачі сигналу становить -15 дБм, а чутливість приймача -28 дБм. Випробування на затування сигналу в кабелі між пристроями показує, що кабель має затування 16 дБ. Швидкі розрахунки показують, що втрати на оптичному приймачі складають: -31 дБм. Оптичному приймачу потрібна потужність -28 дБм або більше.  $-31 \text{ дБм} < -28 \text{ дБм}$ , тому ця схема не працюватиме належним чином.

### 3.2 Тестування оптичного вимірювача в часовій області (OTDR)

Найскладнішим випробувальним обладнанням, яке зазвичай використовується для волоконно-оптичного кабелю, є пристрій під назвою оптичний вимірювач відбиття в часовій області, або скорочено OTDR (рефлектометр),

що є простим пристроєм, який надсилає короткий імпульс (зазвичай тривалістю 1 наносекунду) енергії в кабель і вимірює, скільки цієї енергії відбивається назад до нього.

Рефлектометр «у часовій області» – це рефлектометр, який відображає результат своїх випробувань відносно часу, що минув між моментом надсилання імпульсу та моментом отримання будь-яких відбиттів. На рисунку 3.4 показано загальний вигляд оптичного рефлектометра.



Рисунок 3.4 – Вигляд оптичного рефлектометра в часовій області [7]

Отже, «оптичний» рефлектометр у часовій області – це TDR, який працює з оптоволоконним кабелем. Рефлектометр AQ7275 є одним з найбільш розповсюджених рефлекто-метрів у світі. Модельний ряд розширено до 9 моделей на вибір з динамічним діапазоном до 45 дБ. Можливості вимірювання довжин хвиль охоплюють діапазон від 850 нм (MMF) до 1650 нм (SMF), що робить цю модель чудовим вибором для FTTH та міських, опорних мереж [12].

Покращення включають опцію PON, що дозволяє точно аналізувати події після розгалужувача зі значним зменшенням ефектів недорегулювання. Також унікальною для галузі є вбудована секція пускового оптоволоконна, що усуває необхідність в окремому пусковому коробці. Найновіші стандартні функції включають зручну можливість відображення зонда для перевірки оптоволоконного роз'єму за допомогою одного зі стандартних портів USB

введення/виведення пристрою.

На рисунку 3.5 показано зразок кривої з екрана рефлектометра. Це зображення показує відносно відбите світло, отримане пристроєм з плином часу. Кожна вертикальна лінія сітки представляє різницю в потужності 0,1 дБ, а кожна горизонтальна лінія сітки представляє 1 наносекунду часу. Літерами А, В та С є маркерами, доданими для легшого пояснення траєкторії [11].

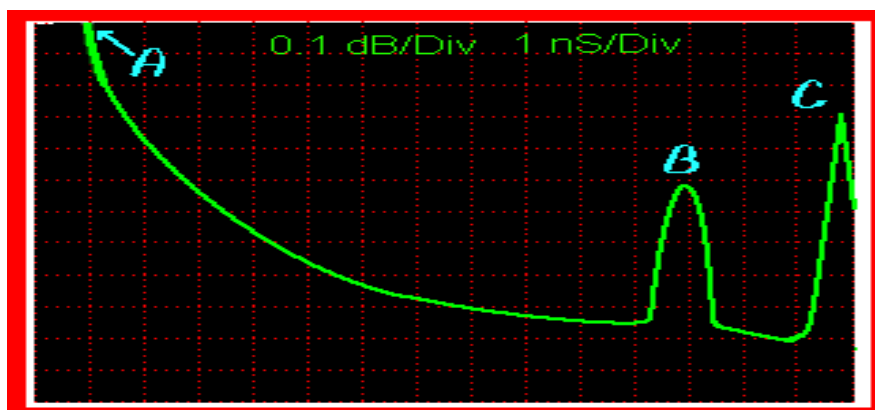


Рисунок 3.5 – Приклад дисплея OTDR

Ділянка 0А відповідає надісланому імпульсу світла на кабель і отримання світла назад через скло. Між точками А і В спостерігається нормальне зворотне розсіювання світла, коли воно проходить через скло. Це показано як плавна, поступово спадна крива. У точці В спостерігається пік на трасі. Він спричинений раптовим збільшенням кількості отриманого світла і зазвичай спричинений розривом, мікровигином або зрощенням кабелю, і якщо результат тесту на затухання показує високі втрати в кабелі, це та точка, де він, найімовірніше, відбувається. Зрештою, в точці С маємо кінець кабелю та спостерігається ще один пік на трасі, спричинений світлом, що відбивається від дзеркально-полірованого кінця волокна.

Інформація, показана на наведеній вище трасі OTDR, може бути корисною для усунення несправностей довгих волоконно-оптичних кабелів, оскільки вона не лише показує, наскільки велика несправність у кабелі, але й де воно знаходиться.

У наведеному вище прикладі ми маємо досить значний розрив у точці, що знаходиться на відстані 12 нС від джерела. Оскільки швидкість поширення світла у склі становить приблизно 0,3 нс/метр, то розрив знаходиться в точці приблизно за 3,6 метра від кінця оптоволоконного кабелю, де він тестувався. Приблизна довжина прокладеного кабелю за розташуванням точки С становить близько 4,4 метра. Тому тут пропонується відійти на 3,6 метра від рефлектометра (або на 0,82 метра від іншого кінця кабелю) та почати фізично оглядати кабель на наявність зрощень, розривів, здавлень, перегинів чи інших пошкоджень.

### **3.4 Вимірювання втрат за допомогою вимірювача оптичної потужності**

Метод AFL пропонує низку надійних портативних рішень для тестування втрат напруги, призначених для використання поза межами виробничих потужностей. Оптичні вимірювачі потужності, джерела світла та тестові комплекти AFL є необхідними інструментами для техніків, які працюють з оптоволоконними мережами.

Для перевірки втрат використовується вимірювач потужності, але також потрібне випробувальне джерело. Вимірювач вимірюватиме оптичну потужність, яка втрачається в кожній частині кабелю. Кабель з'єднується з робочим опорним кабелем. Два методи, що використовуються для перевірки втрат – це односторонні та двосторонні втрати. При односторонньому тестуванні втрат використовується лише стартовий кабель. При двосторонньому тестуванні втрат до вимірювача також підключається приймальний кабель [11].

Підсумовуючи вищесказане, можемо констатувати, що оптоволоконні кабелі потребують тестування, щоб переконатися в їх належній роботі. Ці тести можуть бути такими простими, як освітлення одного кінця світлом і пошук його на іншому кінці, або сканування кабелю за допомогою рефлектометра (OTDR). Прості тести дають лише дуже базову інформацію, а більш складні

тести дають більше інформації, але вартість і складність використання обладнання швидко зростають зі складністю тесту. OTDR потрібен для пошуку місця несправностей у кабелі, а для проведення тестів на затухання потрібні джерело світла та вимірник оптичної потужності.

### **3.4 Тестування та моніторинг PON-мереж**

Важливою перевагою волоконно-оптичних ліній зв'язку є їх потенційна довговічність. Однак для забезпечення багаторічної роботи необхідні відповідні умови і головне них – відсутність механічних напружень у волокні. Підвищений натяг волокна в кабелі викликає погіршення його характеристик міцності, що призводить до розриву волокна.

Інформаційна ємність сучасного інформаційного каналу на основі волоконно-оптичної лінії передачі (ВОЛП) перевищує значення 1 Тбіт/с одного оптичного волокна при відстанях між регенераторами близько 200 км.

Водночас послідовні простоя ліній зв'язку скорочують доходи операторів, погіршують їх репутацію, зменшують надходження інвестицій, знижують показники якості обслуговування. У зв'язку з цим останнім часом оператори зв'язку починають інвестувати не малі кошти в розвиток інфраструктури своїх волоконно-оптичних мереж з акцентом на впровадження та вдосконалення систем управління та автоматичного моніторингу стану ліній та каналів зв'язку.

Незалежно від методу контролю оптичних волокон, система моніторингу повинна забезпечувати: дистанційний контроль пасивних та активних волокон оптичних кабелів; точне та своєчасне документування та складання звітності; автоматичне виявлення несправностей із зазначенням їх точне місце розташування; контроль та управління процесом оповіщення про пошкодження оптичних кабелів; проведення вимірювань параметрів оптичних волокон у ручному режимі; прогнозування змін параметрів оптичних кабелів; можливість розширення функціональності системи при впровадженні нових технологій передачі на мережі зв'язку.

Найбільш ефективно перелічені завдання можуть бути вирішені за допомогою систем автоматичного моніторингу, що включають систему віддаленого контролю оптичних волокон, програму прив'язки топології мережі до електронної географічної карти місцевості, а також бази даних оптичних компонентів, критеріїв та результатів контролю.

Як зазначалось вище, дистанційний контроль оптичних волокон виконується оптичним імпульсним рефлектометром. При цьому системи мають дозволяти проводити моніторинг як вільних, так і зайнятих волокон. У першому випадку виконується моніторинг вільних резервних оптичних волокон, за станом яких судять про справність всього волоконно-оптичного кабелю. У другому випадку проводиться моніторинг оптичних волокон, за якими передається трафік систем передачі. Для реалізації цього методу тестування використовується робоча довжина хвилі рефлектометра, що відрізняється від робочої довжини хвилі систем передачі, а у схему мережі моніторингу вводиться ряд пасивних оптичних компонентів для мультиплексування та поділу інформаційних сигналів і сигналів рефлектометра [7, 11].

Для спрощення даної процедури, використовуються методи тестування багатоточкових мереж, засновані на почерговому підключенні волокон до OTDR через керований комутатор (оптичний перемикач), зводячи тестування багатоточкових мереж, для тестування за схемою точка-точка. Таким чином, слід розрізнити методи: одночасного тестування волокон багатоточкових мереж; різночасного тестування волокон багатоточкових мереж.

В той же час, тестування оптичних кабелів може проводитися по волокну, що забезпечує або не забезпечує передачу даних, виділивши методи тестування: по вільному «темному» волокні з активного волокна.

Розглянемо дані методи більш докладно, враховуючи відмінність у підходах до аналізу рефлектограм для магістральної мережі та мереж доступу та розподілу. У першому випадку аналіз осуїснує автоматично більшістю OTDR, що виявляють різні події по всій довжина волокна.

При вимірюваннях в мережах доступу та розподілу, наявність

компонентів, призводить до того, що OTDR відображає множинну рефлектограму, аналіз якої до відгалуження досить простий і виконується аналогічно до аналізу магістральної мережі. Однак після розгалуження виконати аналіз рефлектограми для знаходження та вимірювання подій на різних каналах стає неможливо, тому що багатоточкові мережі додають до неї ще один вимір, який OTDR самостійно не в змозі ідентифікувати незважаючи на те, що інформація на рефлектограмі є.

Метод різночасного тестування оптичних волокон у багатоточкових мережах заснований на класичному вимірюванні OTDR з'єднання точка-точка сформованого відповідною комутацією оптичних перемикачів.

По цьому користувачу доступні всі функції, що забезпечуються рефлектометром, та робота з системою віддаленого тестування оптичних волокон (RFTS – Remote Fiber Test System) фактично є роботою з OTDR в режимі дистанційного керування, що дозволяє обробляти, аналізувати рувати та проводити вимірювання, маючи у своєму розпорядженні широкі можливості виділення та ідентифікації відхилень поточної рефлектограми щодо еталонної.

Тестування по пасивних оптичних волокнах засноване на тестуванні резервного волокна оптичного кабелю (рис. 3.6) при довжині хвилі  $\lambda_{\text{траф}}$  оптичного променя трафіку, незалежної від довжини хвилі  $\lambda_{\text{тест}}$  тестованого оптичного випромінювання [11].

Застосування даного методу при своїй очевидності та простоті реалізації зумовлює необхідність дублювання інфраструктури контролю гіпотетичного волокна, що відображає властивості всього кабелю, та, за деякими даними, дозволяє виявити до 90% його порушень.

На рисунку 3.7 показана схема організації контролю оптичного кабелю по пасивних оптичних волокнах. Тут TX (Transceiver) і RX (Receiver) – відповідно передавальні та приймальні мережеві пристрої, RTU (Remote Test Unit) – пристрій віддаленого контролю оптичних волокон, OTAU (Optical Test Access Unit) – оптичний перемикач, що забезпечує доступ до контрольованих оптичних волокон.

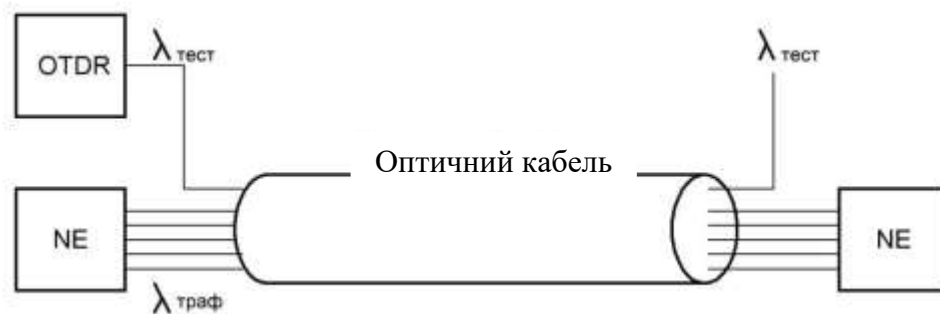


Рисунок 3.6 – Метод контролю оптичного кабелю по резервному волокну [11]

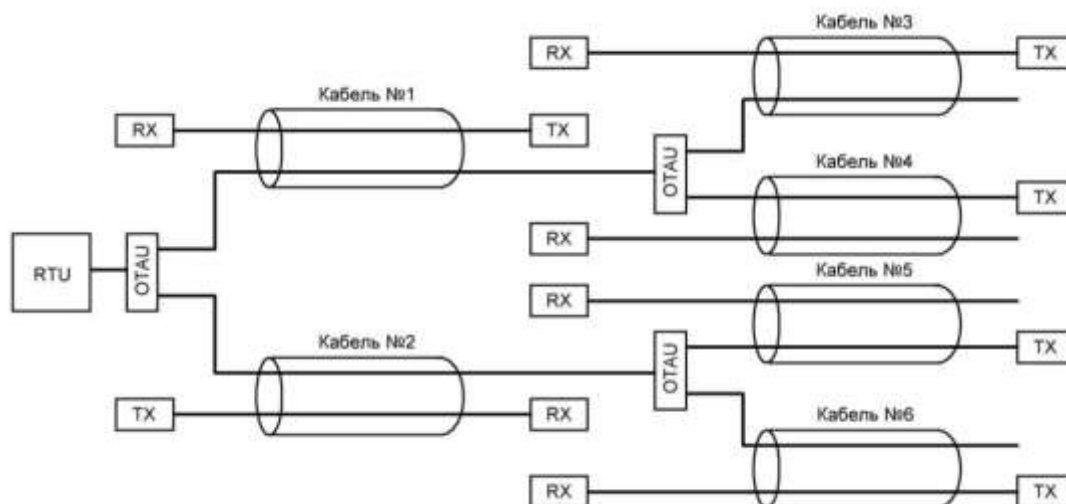


Рисунок 3.7 – Схема контролю оптичних кабелів по резервному волокну [9]

Як відомо, при тестуванні по активних оптичних волокнах для передачі даних у ВОЛП зазвичай застосовуються довжини хвиль оптичного випромінювання на рівні 1310 нм чи 1550 нм. Отже, для контролю стану волокон було б доцільним використовувати  $\lambda_{\text{тест}} = 1550$  нм при довжині хвилі  $\lambda_{\text{траф}} = 1310$  нм або  $\lambda_{\text{тест}} = 1310$  нм – при передачі на довжині  $\lambda_{\text{траф}} = 1550$  нм. У той же час по економічних міркуваннях, викликаними необхідністю збільшення ємності каналів передачі даних, часто використовуються обидві зазначені довжини хвиль  $\lambda_{\text{траф1}} = 1310$  нм та  $\lambda_{\text{траф2}} = 1550$  нм, тому в останньому випадку для контролю необхідно використовувати іншу довжину хвилі, наприклад,  $\lambda_{\text{тест}} = 1625$  нм, яка значно відрізняється від використовуваних довжин для передачі даних і може бути ефективно виділена на приймальній стороні лінії зв'язку.

З цією метою на передавальній стороні ВОЛП (рис. 3.8) вводяться WDM, що об'єднують довжину хвилі тестуючого випромінювання з довжиною хвилі передачі даних мережевим обладнанням NE (Network Equipment), а для виключення взаємного впливу процесів передачі даних та контролю оптичного волокна в схему вводяться фільтри F2 і F3.

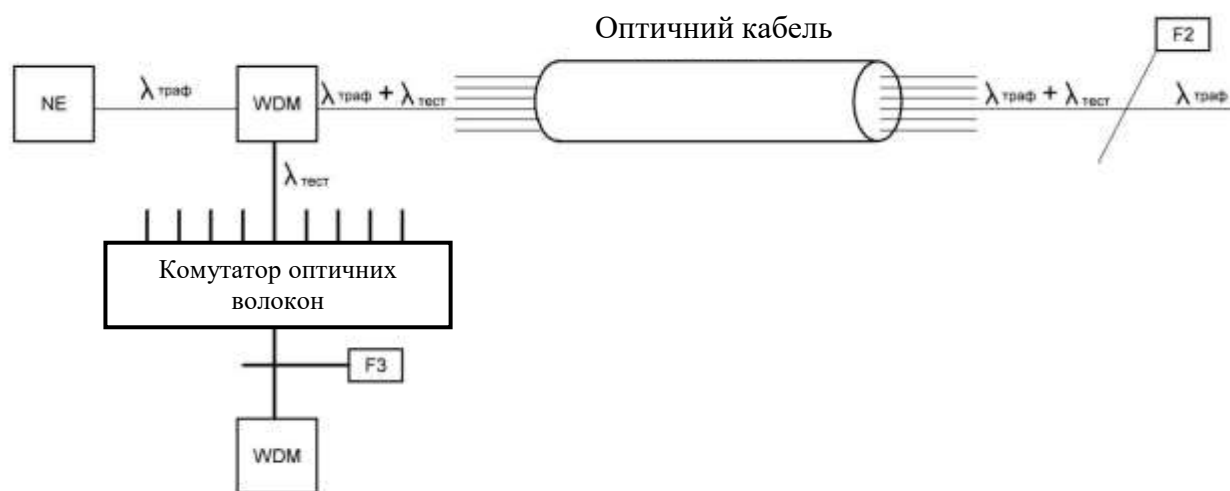


Рисунок 3.8 – Метод контролю оптичного кабелю по активному волокну [9]

Фільтри запобігають попаданню тестуючого випромінювання на входи NE, а випромінювання передачі даних – на OTDR. Застосування довжин хвиль 1310 нм, 1550 нм та 1625 нм викликано тим, що в цьому випадку оптичні компоненти, що використовуються, як правило, у волоконно-оптичній техніці, забезпечують найнижчі втрати передачі, гарну ізоляцію та найкраще придушення відбитих хвиль.

## РОЗДІЛ 4

### СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

#### **4.1 Організація передачі даних в одноволоконному режимі в оптичному каналі мережі FTTB з використанням Y-розгалужувача**

Через швидкий розвиток в останні роки мереж широкопasmового абонентського доступу, які можна організувати тільки з використанням оптичних технологій, на таких мережах у процесі експлуатації при розвитку мереж виникає проблема відсутності вільних оптичних волокон. Будівництво нових розгалужувальних ВОЛЗ або використання систем спектрального ущільнення в більшості таких випадків на мережах FTTB є економічно невигідним або технічно нереалізованим.

У даному пункті розглянуто спосіб вирішення проблеми відсутності вільних оптичних волокон на розгалужувальних ВОЛЗ мереж FTTB шляхом переведення діючих оптичних систем передачі (оптичних каналів передачі даних) з двоволоконного в одноволоконний режим роботи із застосуванням оптичних Y-розгалужувачів. Волокна, що звільнилися, можуть використовуватися для організації розширення мереж широкопasmового абонентського доступу.

Схема організації одноволоконного режиму роботи оптичних каналів передачі даних мереж FTTB із двоволоконного в одноволоконний режим роботи із застосуванням оптичних Y-розгалужувачів наведена на рисунку 4.1.

Передавальні оптичні та приймальні модулі ПОМ та ПРОМ у складі SFP модулів, встановлених у комутаторі агрегації та комутаторі доступу, підключаються до оптичних конекторів 1 і 2 Y-розгалужувачів. Конектори 3 підключаються до робочого волокна елементарного кабельного ділянки ВОЛП через оптичні порти кросів ODF 1 і ODF 2.

Передача оптичних сигналів у напрямку комутатор агрегації комутатор доступу і комутатор доступу комутатор агрегації між ними відбувається на одній довжині хвилі 1310 нанометрів по одному оптичному волокну.

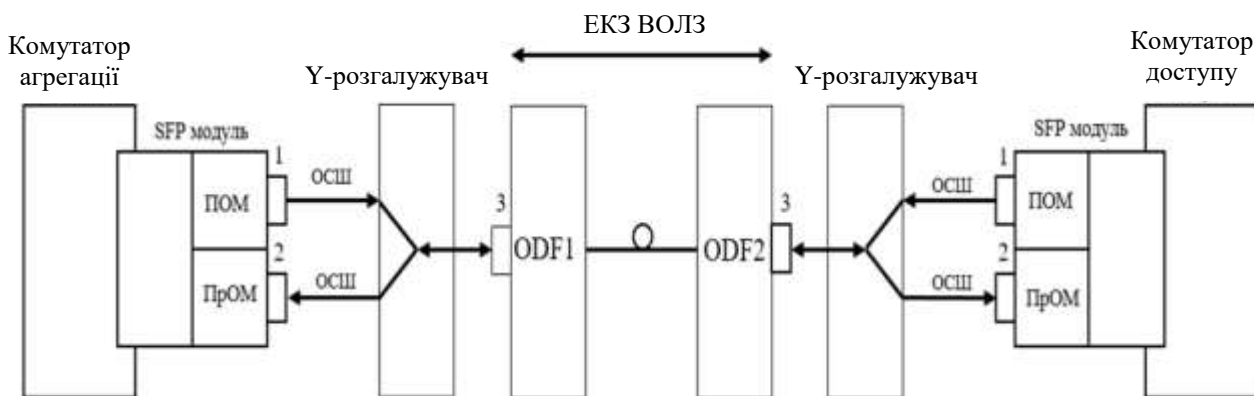


Рисунок 4.1 – Схема організації передачі даних в одноволоконному режимі мережі FTTB з використанням оптичного Y-розгалужувача [5]

В одноволоконному режимі передачі з'являються такі чинники, як Релеївське розсіювання і відбиття Френеля, яких немає у двоволоконному режимі передачі. Для Релеївського розсіювання при посилянні світлового імпульсу по волокну частина імпульсу стикається на наявні у волокні мікроскопічні частинки, які називаються «домішкою», і розсіюється у всіх напрямках. Подане явище називається релеївським розсіюванням. Частина світлової енергії – близько 0,0001% розсіюється назад у напрямку протилежному напрямку поширення імпульсу і це називається зворотним розсіюванням.

Оскільки в процесі виготовлення волокна домішки розподіляються рівномірно по всьому волокну, це явище розсіювання виникає по всій його довжині. На рисунку 4.1 представлено релеївське розсіювання в оптичному волокні.

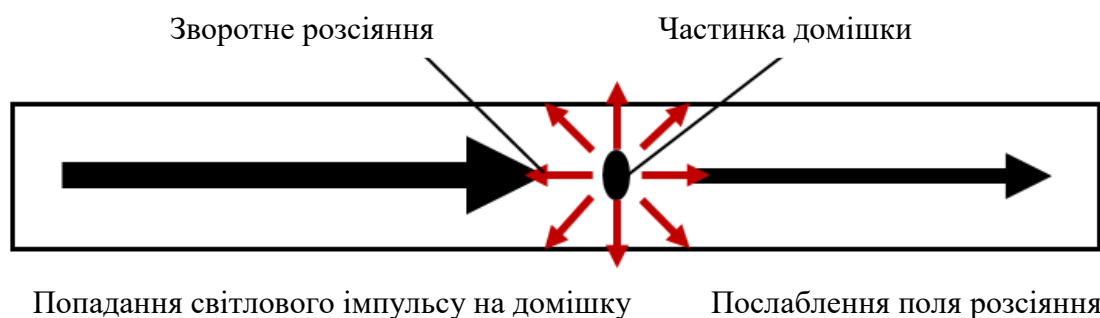


Рисунок 4.1 – Релеївське розсіювання в оптичному волокні [5]

Релеєвське розсіювання – це основна причина втрат, що мають місце у волокні. На більш довгих світлових хвилях розсіювання менше, ніж на більш коротких, так, наприклад, світло на 1550 нм втрачає через релеївське розсіювання від 0,2 до 0,3 дБ/км у той час як на 850 нм – від 4,0 до 6,0 дБ/км. Домішки, що мають більш високу щільність, також збільшують розсіювання і, отже, підвищують рівень питомого згасання. Оптичний рефлектометр може вимірювати рівні зворотного розсіювання з великою точністю використовуючи цю здатність виявлення незначних змін характеристик волокна в будь-якій його точці.

При Френелівському відбитті, коли світло, що розповсюджується в оптичному волокні, потрапляє в матеріал з іншою густиною, наприклад, у повітря, частина світлової енергії (до 4%) відбивається назад, до джерела світла, тоді як решта світлової енергії продовжує поширюватися далі.

Різкі зміни густини матеріалу мають місце на кінцях волокна у обривах волокна та іноді у оптоволоконних стиках. Кількість відбитого світла залежить від величини зміни густини матеріалу, яка характеризується показником заломлення. Більш високий показник заломлення означає велику густину, а також від того кута, під яким світло падає на поверхню розподілу між двома матеріалами. Це називається френелівським відбиттям (рис. 4.3) і використовується в оптичному рефлектометрі.

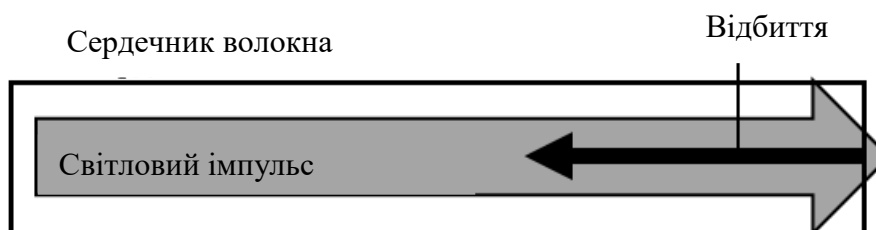


Рисунок 4.3 – Френелівське відображення в оптичному волокні [9]

У цифровому з'язку якість передачі сигналів і номінальна довжина ЕКУ визначаються коефіцієнтом помилок по бітах на ділянці, що регенерує, який залежить від відношення сигнал/шум (SNR) на вході приймального пристрою.

У двоволоконному режимі  $SNR_2$  визначається за формулою (4.1):

$$SNR_2 = P_{пр2} - P_{ш2} = (P_{пер} - a_{еку}) - P_{ш2}, \quad (4.1)$$

де  $P_{пер}$  – рівень передачі оптичного сигналу на виході ПОМ, дБ;

$a_{еку}$  – загасання оптичного волокна на ЕКЗ, дБ;

$P_{пр2}$  – рівень прийому на вході ПрОМ, дБм;

$P_{ш2}$  – рівень шумів регенераційної ділянки, наведений до входу ПрОМ, дБм.

В одноволоконному режимі з'являються нові фактори, що зменшують  $SNR_1$  проти  $SNR_2$ .

До цих факторів належать такі явища:

1. Через додаткові втрати  $Y$ -розгалужувачів  $a_p$  у напрямках 1-3 і 3-2 величина  $a_{еку}$  збільшується на  $2a_p$ , відповідно зменшується  $SNR_1$ . Величина  $a_p$  для зварних біконічних  $Y$ -розгалужувачів з коефіцієнтом поділу 1/2 знаходиться в межах 3,5...4 дБ (з урахуванням зварювань вихідних оптичних виделок усередині розгалужувача).

2. Частина оптичного сигналу, що передається, переходить через  $Y$ -розгалужувач на вхід свого ПрОМ, створюючи додаткові перехідні шуми з рівнем, які визначаються з рівняння (4.2):

$$P_{шпер} = P_{пер} - A_{пер}, \quad (4.2)$$

де  $A_{пер}$  – перехідне згасання розгалужувача.

Для зварних біконічних  $Y$ -розгалужувачів, перехідне згасання знаходиться в межах 50-55 дБ. Якщо рівень передачі на виході ПОМ  $P_{пер} = 0$  дБм, то потужність шумів на вході свого ПОМ в цьому випадку  $P_{шпер} = 3,16...10$  нВт.

3. Частина оптичного сигналу, що передається, через френелівське відображення в оптичних роз'ємних з'єднаннях (ОРС) оптичних кросів ЕКУ повертається на вхід ПрОМ у вигляді додаткових шумів з рівнем, що визначаються з рівняння (4.3):

$$P_{\text{шф}} = P_{\text{пер}} - 2a_p + RL, \quad (4.3)$$

де  $RL$  – коефіцієнт зворотного (френелівського) відображення в ОРС оптичних кросів, що залежить від типу полірування оптичних конекторів 3 (рисунок 4.3) і знаходиться в межах, зазначених у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Коефіцієнт зворотного відображення у різних ОРС [10]

Тип полірування	РС	SPC	UPC	ABC
RL, дБ	-30	-40	-50	-60
Потужність зворотного френелівського відображення на вході ПрОМ, нВт	160	16	1,6	0,16

У таблиці 4.1 за результатами розрахунків рівнів  $P_{\text{шф}}$  також розрахована потужність зворотного френелівського відображення  $P_{\text{шф}}$  на вході ПрОМ для умов:  $P_{\text{пер}} = 0$  дБм,  $2a_p = 8$  дБ. Через згасання в ЕКУ потужність відбитого сигналу від далекого кросу на порядок менша, ніж від ближнього кросу, вже за довжини оптичного волокна (ОВ) 10...12 км.

При організації одноволоконного режиму необхідно також враховувати, що через технологічні допуски при виготовленні роз'ємних оптичних з'єднувачів, появи подряпин і мікротріщин на торцях ОВ в оптичних конекторах вже після кількох включень і вимкнень оптичних конекторів зворотне відображення  $RL$  для всіх типів поліровок, крім кутової APC, при кутовий APC, при кутовий APC, при кутовий APC, при кутовий APC.

4. Частина оптичного сигналу, що передається, розсіюється на неоднорідностях оптичного волокна в ЕКУ і повертається на вхід ПрОМ у вигляді додаткових шумів релєївського розсіювання. Ці шуми створюються всіма оптичними імпульсами, що проходять через ВВ.

Рівень додаткового шуму на вході ПрОМ від кожного і оптичного імпульсу визначається за формулою (4.4):

$$P_{\text{рі}} = P_{\text{пер}} - 2a_p - 2\alpha L_i + G_p(\Delta L), \quad (4.4)$$

де  $L_i$  – відстань від ПрОМ до  $i$ -го імпульсу, км;

$\alpha$  – коефіцієнт загасання ОВ на робочій довжині хвилі ОСП, дБ/км;

$G_p(\Delta L)$  – коефіцієнт зворотного релеевського розсіювання оптичного імпульсу, дБ;

$\Delta L$  – довжина відрізка ОВ, на якому створюється зворотне релеевське розсіювання, м.

Величина  $\Delta L$  залежить від тривалості імпульсу  $\Delta T$ :

$$\Delta L = \Delta T \cdot c / n_c, \quad (4.5)$$

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі;

$n_c \approx 1,5$  – показник заломлення серцевини ОВ.

Тактовий інтервал  $\Delta T$  обернено пропорційний швидкості передачі оптичного цифрового сигналу  $V_{\text{пер}}$ :  $\Delta T = 1/V_{\text{пер}}$ .

З урахуванням усіх додаткових факторів в одноволоконному режимі відношення сигнал/шум визначається з рівняння (4.6):

$$SNR_1 = P_{\text{пр1}} - P_{\text{ш1}} = (P_{\text{пер}} - a_{\text{еку}} - 2a_p) - P_{\text{ш1}}. \quad (4.6)$$

При розрахунку  $P_{\text{ш1}}$  необхідно врахувати, що в одноволоконному режимі на вході ПрОМ зберігаються всі шуми двоволоконного режиму та додаються нові шуми одноволоконного режиму, тому:

$$P_{\text{ш1}} = 10 \lg [(P_{\text{ш2}} + P_{\text{ш пер}} + P_{\text{шф}} + P_{\text{шр}}) / 1 \text{ мВт}]. \quad (4.7)$$

Зменшення  $SNR_1$  порівняно з  $SNR_2$  на  $\Delta SNR$  еквівалентно збільшенню втрат ЕКУ в одноволоконному режимі на величину:

$$\Delta a_{\text{еку}} = \Delta SNR = SNR_2 - SNR_1 = 2a_p - P_{\text{ш2}} + P_{\text{ш}}. \quad (4.8)$$

Щоб компенсувати зменшення відношення сигнал/шум в одноволоконному режимі, необхідно зменшити згасання ЕКУ на  $\Delta a_{\text{еку}}$  і для цього необхідно зменшити номінальну довжину ЕКУ:

$$L_{\text{НОМ } 1} = L_{\text{НОМ } 2} - (\Delta a_{\text{еку}} / \alpha + \Delta \alpha), \quad (4.9)$$

де  $L_{\text{НОМ } 2}$  – номінальна довжина ЕКЗ у двоволоконному режимі, м;

$\alpha$  – коефіцієнт загасання ОВ на робочій довжині хвилі ОСП, дБ/км;

$\Delta \alpha$  – збільшення коефіцієнта загасання через зварні з'єднання в муфтах.

Якщо розрахована  $L_{\text{НОМ } 1}$  дорівнює або перевищує реальну довжину ОВ на ЕКЗ мереж FTТВ, то можливе переведення чинної ОСП в одноволоконний режим.

## 4.2 Моделювання інформаційної безпеки у ВОСП

Аналіз існуючих методів і засобів забезпечення інформаційної безпеки у волоконно-оптичній лінії зв'язку показав, що найбільш актуальним є метод зашумлення лінійного тракту оптичного волокна з боку приймача інформації.

Проводимо дослідження моделі захисту інформації від несанкціонованого доступу у волоконно-оптичній лінії зв'язку (ВОЛЗ). На передавальній стороні ВОЛЗ формується сумарний сигнал шляхом змішування шумового та інформаційного сигналу і вводиться у волоконно-оптичну лінію зв'язку, а на приймальній стороні ВОЛЗ з прийнятого оптичного випромінювання виділяють інформаційний сигнал.

Імітаційна модель пристрою (рис. 4.1) складається з таких основних елементів:

- джерело даних, генератор випадкових цілих чисел – Random-Integer (Communications Blockset/Random Data Sources), що виробляє масив чисел в інтервалі від 0 до N-1;

- кодер Ріда-Соломона – RS encoder (Communications Blockset/Block). Він



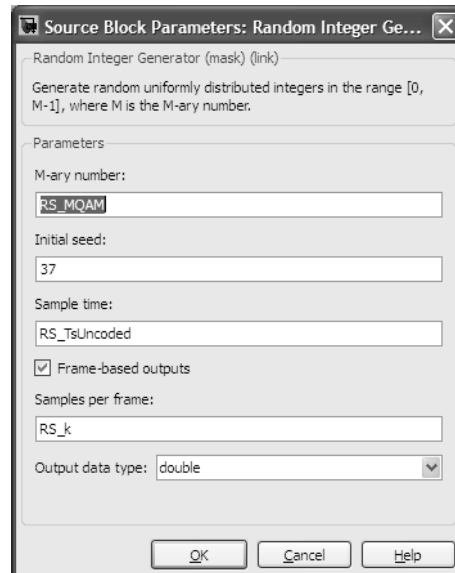
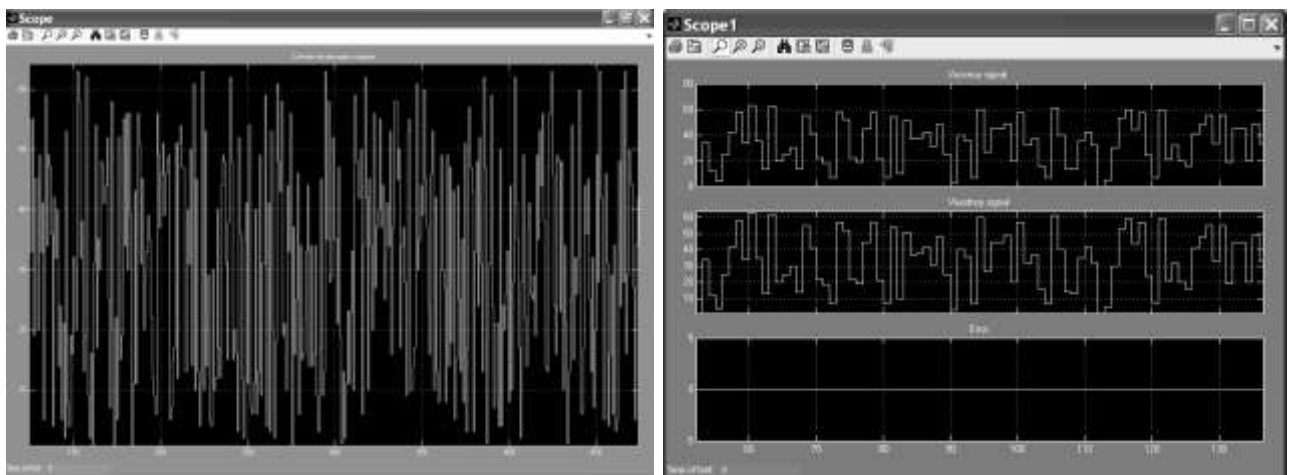


Рисунок 4.2 – Параметри блоку Random-Integer

Для RS encoder задаємо довжини повідомлення  $K=RS\_k$  і кодового слова  $N=RS\_n$ . Залишаємо значення за замовчуванням  $g(x)=1011$ , з якого автоматично обчислюється породжуючий поліном. Аналогічно задаємо ті ж параметри для блоку RS decoder. На рисунку 4.3, а, б показано результати моделювання.



а)

б)

Рисунок 4.3 – Сигнал на виході кодера (а) та інформаційний сигнал (б)

Результати моделювання показують можливість виділення із сумарного сигналу, отриманого змішуванням шумового та інформаційного сигналу, інформаційного сигналу на приймальній стороні лінії зв'язку.

#### 4.4 Практичне дослідження ВОЛЗ та аналіз оптичних вимірювань

Дослідження виконувались на підприємстві «КУЛНЕТ», що має ліцензію на будівництво ВОЛЗ та обладнання для рефлектометричних вимірювань. На прикладі показано проектування оптоволоконної кабельної лінії (ВОЛЗ) у м. Львів, вул. Дорошенка, 43 (БС LV0003 ТОВ «Лайфселл») – вул. Матейка, 6 (БС LV0170, ТОВ «Лайфселл»). Довжина оптичної траси 739 м, оптична довжина кабелю 759 м. Марка кабелю: ОКТБг-М(2,7) П-2\*12Е1-0,40Ф3,5/0,30Н19-24.

На рисунках 4.4 та 4.5 показано схему монтажу муфт на будівельній ділянці та схему прокладання кабелю ВОЛЗ.

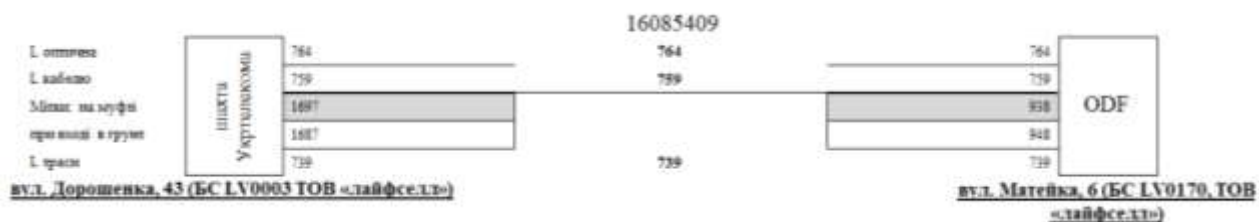


Рисунок 4.4 – Схема монтажу муфт на будівельній ділянці



Рисунок 4.5 – Схема прокладання кабелю ВОЛЗ

На рисунку 4.6 показано схему прокладання кабелю. Тут показано схему монтажу в кабельному каналі на існуючу муфту в колодязі ПАТ «Укртелеком».

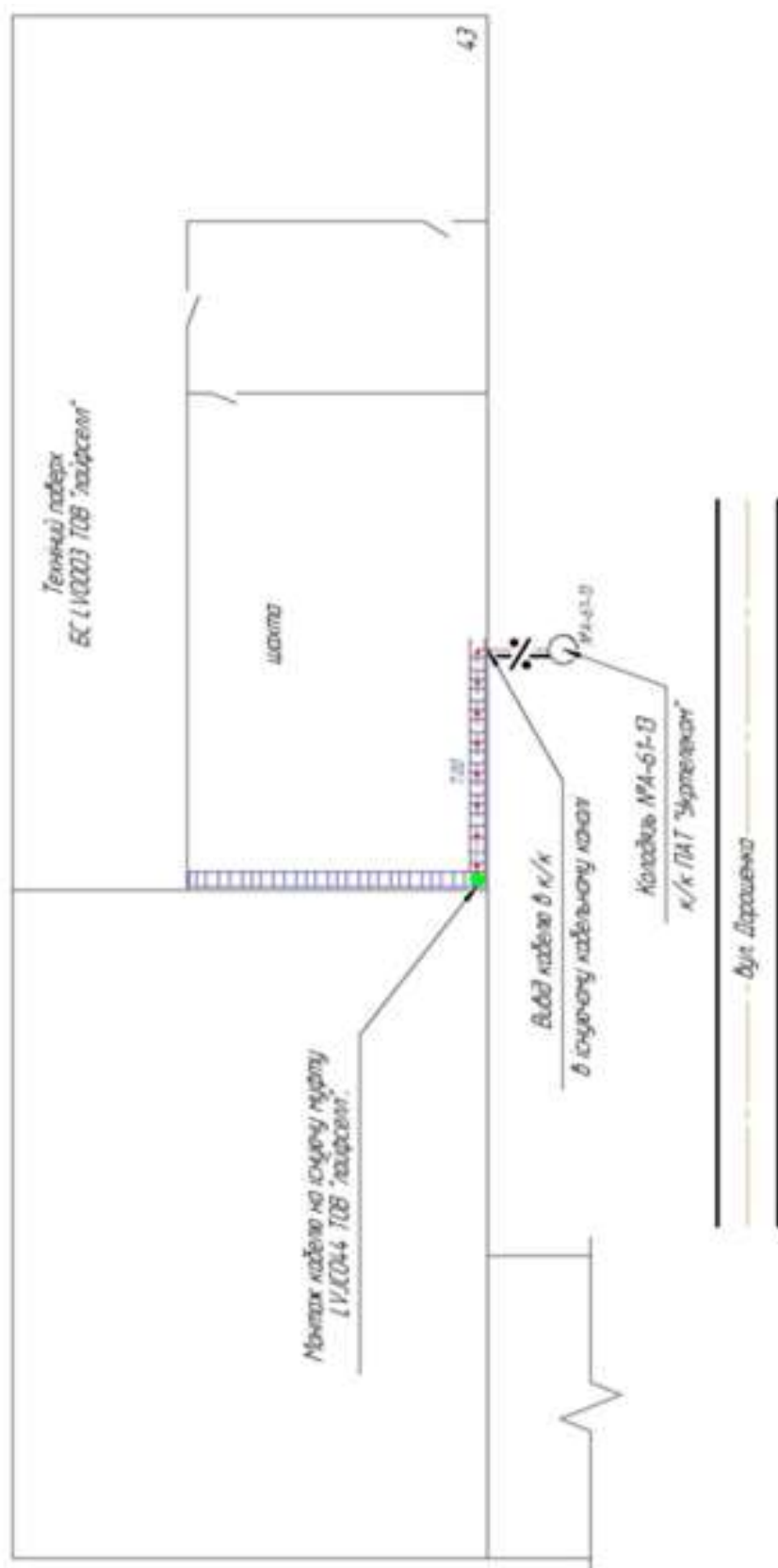


Рисунок 4.7 – Схема прокладання кабелю по трасі

Оптичні вимірювання на регенераційній ділянці:

Станція А: вул. Дорошенка, 43 (БС LV0003 ТОВ «лайфселл»).

Станція Б: вул. Матейка, 6 (БС LV0170, ТОВ «лайфселл»).

Вимірювальні прилади:

тип джерела випромінення: JDSU OLP-55; серійний №М-0361;

тип приймача: JDSU OLS-55; серійний №Н-0213;

$L_{\text{опт.}}=896$  м.

В таблиці 4.2 показані результати оптичних вимірювань проєктованої ВОЛЗ.

Таблиця 4.2 – Результати оптичних вимірювань на регенераційній ділянці

№ ОВ	Згасання, дБ		Середнє $\lambda=1310$ нм	Згасання, дБ		Середнє $\lambda=1550$ нм
	А→Б $\lambda=1310$ нм	Б→А $\lambda=1310$ нм		А→Б $\lambda=1550$ нм	Б→А $\lambda=1550$ нм	
1	0,78	0,71	0,74	1,05	0,97	1,01
2	0,84	0,79	0,82	0,95	0,99	0,97
3	0,88	0,81	0,85	1,03	1,06	1,05
4	0,74	0,70	0,72	1,01	1,05	1,03
5	0,81	0,69	0,75	0,99	1,03	1,01
6	0,89	0,66	0,77	1,15	0,86	1,01
7	0,90	0,80	0,85	1,19	0,93	1,06
8	0,65	0,75	0,70	0,84	1,12	0,98
9	0,72	0,77	0,75	0,98	1,18	1,08
10	0,67	0,76	0,71	1,16	1,1	1,13
11	0,66	0,68	0,67	1,14	0,93	1,04
12	0,75	0,74	0,75	0,88	1,14	1,01

Максимальне загасання регенераційної ділянки (дБ) визначається з рівняння (4.10):

$$A = [a \cdot L + (0,1 \cdot N) + 0,4 \cdot 2], \quad (4.10)$$

де  $a$  – максимальне значення коефіцієнта загасання на даний ОК, дБ/км;

$L$  – оптична довжина кабелю, км;

0,1 – номінальне значення загасання в місці зварювання для одномодового оптоволоконна (для багатомодового оптоволоконна – 0,3), дБ;

$N$  – кількість зрощувань ОВ на регенераційній ділянці;

0,4 – загасання в роз'ємних з'єднувачах, дБ.

$$A_{\text{розр}} (\lambda = 1310 \text{ нм}) = 1,30 \text{ дБ.}$$

$$A_{\text{розр}} (\lambda = 1550 \text{ нм}) = 1,19 \text{ дБ.}$$

Для порівняння при пропусканні пучка світла довжиною 1310 нм втрати є більшими, що говорить про доцільніше застосування більших довжин хвиль в оптокабелі.

#### 4.4 Електромагнітна сумісність ВОСП з іншими системами передачі

Завданням ЕМС є забезпечення стабільної роботи пристроїв чи систем в електромагнітному оточенні без випромінювання ними таких електромагнітних перешкод (ЕМП), які могли б позначитися на роботі сусідніх систем. Робота по забезпеченню ЕМС ведеться за двома напрямками:

- контроль основних параметрів передачі обладнання (потужність, швидкість передачі даних тощо) при спільній роботі з іншими системами або пристроями. Обладнання має бути стійким до електромагнітних сигналів іншого сусіднього обладнання;

- дослідження потужності випромінювання та впливу устаткування працювати інших пристроїв.

Електромагнітний шум поширюється через фізичні провідники (електропровідність) та повітряне середовище (електромагнітне випромінювання), і, отже, проникнення може бути як від зовнішніх, так і від внутрішніх систем, які є джерелами перешкод [6].

Електромагнітні перешкоди від електричних пристроїв різноманітні та складно піддаються точному опису, специфікації та аналізу. Основами для класифікації ЕМП є характер, частотний склад та параметри передачі. Широко поширений метод класифікації ЕМП, що базується на проходженні електромагнітної енергії від джерела до приймача. Існують чотири види проходження: провідникове (електричний струм); індуктивне (магнітне поле);

емнісне (електричне поле); через випромінювання (електромагнітне поле).

На вхід приймача надходить дуже складний для ідентифікації сигнал, оскільки навіть корисний сигнал через безліч шляхів свого поширення та перевідбиття стає перешкодою. У PLC-системах сигнал на вході приймача залежить також від виду його проходження. Наприклад, на високих частотах конструкції та лінії у друкованих платах можуть сильно випромінювати, а на низьких частотах перешкоди можуть бути результатом сукупності сигналів від обладнання та сигналів основного кабелю. До того ж провідникова емісія може виявлятися в інших різних ділянках системи, сприяючи радіовипромінюванню.

Перехід між радіовипромінюванням та кондуктивною (провідниковою) емісією відбувається в діапазоні 30 МГц, де провідникова емісія нижче цієї величини, а радіовипромінювання вище за неї. Інша класифікація ЕМП базується на трьох параметрах: тривалість, частота повторюваності та робочий цикл.

ЕМП з малою тривалістю лежать у межах від мікросекунд до кількох секунд і поділяються на два класи:

- шум має періодичний характер і високу частоту прямування, яка є основною частотою. Амплітуда шуму залишається зазвичай низькою, і пік амплітуди – власне є основна напруга;

- імпульс має позитивний або негативний пік, накладений на основну напругу. Імпульс характеризується короткою тривалістю, високою амплітудою та швидким часом падіння або зростання. Імпульси можуть бути синхронні або асинхронні з основною частотою. Між імпульсами може виникати шум від різних процесів перемикавання. Типовими пристроями, від яких виникають імпульси, є перемикачі, реле та випрямлячі.

Відповідні методи прямої корекції помилок та пакетування можуть використовуватися для боротьби з перешкодами, спричиненими імпульсним шумом. Однак помилки, внаслідок яких відбувається спотворення інформації, що передається, залишаються, і, як наслідок, здійснюється повторна передача пошкодженої частини даних.

## ВИСНОВКИ

1. Здійснено аналіз інформаційних джерел при передачі інформації по волоконно-оптичних системах, оскільки важливим питанням в області успішного функціонування телекомунікаційних систем є якість передаваних сигналів та їх висока пропускна здатність.

2. Описано фізичні ефекти при передачі оптичних та інформаційних сигналів, їх класифікацію та інформаційну структуру. Проаналізовано вплив фізичних та зовнішніх факторів на функціональні можливості ВОСП, обґрунтовано способи підвищення якості передачі сигналів та пропускної здатності ВОСП.

3. Розглянуто та проаналізовано можливості технічних засобів вимірювань, зокрема оптичних тестерів та рефлектометрів. Такі прилади на сьогодні дають змогу визначати якість передаваних сигналів, діагностувати стан телекомунікаційного обладнання та підвищувати якість надаваних послуг телекомунікаційного підприємства.

4. Проведено вимірювання та аналіз втрат за допомогою вимірювача оптичної потужності, проведено тестування та моніторинг PON-мереж на підприємстві «КУЛНЕТ» на прикладі проектування оптоволоконної лінії, виміряно оптичні параметри на регенераційній ділянці. На основі цього надано рекомендації щодо доцільнішого застосування більших довжин хвиль в оптокабелі для забезпечення найменших втрат та вищої якості оптичних сигналів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fiber optics. URL: <http://www.cableorganizer.com/articles/fiber-optics-tutorial/fiber-optic-technology.html>. (дата звернення: 16.11.2025 р.).
2. Fiber optics. URL: <https://habr.com/uk/post/227647>. (дата звернення: 10.09.2025 р.).
3. Frenzel L. Experiments Manual for Principles of Electronic Communication Systems. Published by McGraw Hill LLC. 2022, 271 p.
4. Kegen Yu. Theory and Practice of GNSS Reflectometry. Xuzhou. China. 2021, 376 p.
5. Liu S., Yu F., Hong R., Xu W., Shao L. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry. Opto-Electron Adv 5, 200078 2022, P.45-56.
6. Mahdiyar O., Mazinan A., Pourmina M., Naser-Moghaddasi M. Super-Resolution Time Domain Reflectometry Method for Microwave Imaging System Applications. IETE Journal of Research. Volume 68. Issue 1. 2022, P. 368-378.
7. Pengfei Wang, Hongjuan Zhang, Nuo Xu, Yu Wang, and Baoquan Jin. Partial Discharge Detection using FDM Phase-Sensitive OTDR with Crosstalk Noise Suppression. Optical Fiber Sensors 2022. Alexandria. Virginia. 2021, 506 p.
8. Petrenko V. I., Kosiachkin Ye. N., Bulavin L. A., Avdeev M. V. Optimization of the initial interface configuration for in-situ neutron reflectometry experiments. J. Surf. Investigation. 2020, P. 96-107.
9. Reflectometr. URL: [https://www.tehencom.com / Categories/OTDR / Principle/OTDR\\_Principle.htm](https://www.tehencom.com / Categories/OTDR / Principle/OTDR_Principle.htm). (дата звернення: 29.11.2025 р.).
10. Telecommunication measurements. <https://foos.sfedu.uk/glava1/1.3.html>. (дата звернення: 16.10.2025 р.).
11. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Напрямні телекомунікаційні системи : лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2021, 104 с.
12. Лишук В. В., Денисюк К.О. Застосування принципів спектрального ущільнення для збільшення пропускної здатності оптоволоконна.

Матеріали XIII-Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». 28 листопада 2025 року, с.131-133.

13. Лишук В. В., Заблоцький В. Ю., Євсюк М. М., Селепина Й. Р., Хвищун М. В. Рефлектометрия у волоконно-оптичних лініях передачі. Технічні вісті. 1(57), 2(58). 2023, С.52-56.