Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет *Кібербезпеки*
(повна назва)
Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Базові принципи і підходи вимірювання загасання в світловодах оптичних ліній
(тема)

Виконав:
здобувач *4* року навчання,
групи *ТРІМІ-22-1*
Петро СУБОТІН
(власне ім'я, прізвище)
Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми *освітньо-професійна*

Освітня програма
«Інформаційно-мережна інженерія»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент *Юрій КОЛТУН*
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри _____ *Дарія ЧЕБОТАРЬОВА*
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Здобувач / *Петро СУБОТІН* /

Керівник / *Юрій КОЛТУН* /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет *Кібербезпеки*
Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)
Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*
Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*
(код і повна назва)
Тип програми *освітньо-професійна*
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма *«Інформаційно-мережна інженерія»*
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«*02*» *червня* 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві *Суботіну Петру Ліонідовичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)
1. Тема роботи *Базові принципи і підходи вимірювання загасання в світловодах оптичних ліній*
затверджена наказом університету від «*02*» *червня* 2026 р. № 466 *Ст*
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії *14 липня 2026 р.*
3. Вихідні дані до роботи *Визначити типи втрат, що впливають на величину загасання у ВС, та проаналізувати відповідні фактори їх виникнення і підходи для зменшення їх впливу. Проаналізувати принципи і підходи проведення вимірювань втрат (загасання), що реалізуються у методах, які ґрунтуються на використанні оптичних тестерів (OLTS) і рефлектометрів (OTDR). Проаналізувати динамічний діапазон OTDR та надати методику оцінки його значення у процесі вимірювання загасання.*

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
Вступ
1. Конструктивні особливості, типи та принципи передачі світла по волоконних світловодах.
2. Загальний аналіз втрат за загасанням у волоконних світловодах.
3. Аналіз методів вимірювання загасання в волоконних світловодах.
4. Загальна методика аналізу та оцінки динамічного діапазону OTDR.
Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) *Слайди у форматі Power Point (назва, мета і актуальність роботи, конструкція та функціонування волоконного світловода, типи волоконних світловодів та їх геометричні характеристики, втрати за загасанням у волоконних світловодах, вимірювальне обладнання для проведення вимірювань загасання у волоконному світловоді, функціональні і конструктивні особливості оптичного тестера, методи вимірювання загасання, що засновані на застосуванні OLTS, вимірювання загасання з використанням OTDR, аналіз та оцінка динамічного діапазону OTDR, висновки)*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	*Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.*	02.06.26	*виконано*
2	*Підбір літератури за темою роботи.*	03.06 – 07.06.26	*виконано*
3	*Виконання розділу 1*	08.06 – 12.06.26	*виконано*
4	*Виконання розділу 2*	13.06 – 19.06.26	*виконано*
5	*Виконання розділу 3*	20.06 – 29.06.26	*виконано*
6	*Виконання розділу 4*	30.06 – 07.07.26	*виконано*
7	*Оформлення пояснювальної записки*	08.07 – 12.07.26	*виконано*
8	*Оформлення презентаційного матеріалу,*		
	підготовка до захисту у ЕК, захист.	13.07 – 18.07.26	*виконано*

Дата видачі завдання *02 червня 2026 р.*

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ *(доц. Юрій КОЛТУН)*
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 25 рис., – табл., 24 джерела, 1 додаток.

ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ВТРАТИ, ЗАГАСАННЯ, ОПТИЧНИЙ ТЕСТЕР, OLTS, ОПТИЧНИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР, OTDR, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ, РЕФЛЕКТОГРАМА, ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН, МЕРТВІ ЗОНИ, ЗОНДУЮЧИЙ ІМПУЛЬС, РЕФЛЕКТОМЕТРІЯ, ЗВОРОТНЕ РЕЛЕЇВСЬКЕ РОЗСІЮВАННЯ

Об'єкти дослідження – волоконний світловод, оптичний рефлектометр, оптичний тестер.

Мета роботи – аналіз основних причин і факторів виникнення загасання у волоконних світловодах, а також загальних принципів, методів і підходів щодо проведення його вимірювання.

Розглянуто конструктивні особливості волоконних світловодів, базові принципи поширення світла в них, а також їх основні типи оптичних волокон, що використовуються для організації оптичних лінії зв'язку. Визначені основні фактори, що спричиняють виникнення втрат (загасання) у волоконному світловоді, та проаналізовані базові методи і підходи проведення їх вимірювань на основі обладнання оптичних тестерів і рефлектометрів. Запропонована загальна методика аналізу та оцінки динамічного діапазону OTDR.

THE ABSTRACT

Explanatory note 80 pages, 25 fig., – tab., 24 sources, 1 app.

OPTICAL FIBER, LOSS, ATTENUATION, OPTICAL TESTER, OLTS, OPTICAL REFLECTOMETER, OTDR, INDEX OF REFRACTION, REFLECTOGRAM, DYNAMIC RANGE, DEAD ZONES, PROBE PULSE, REFLECTOMETRY, REVERSE RELAY SCATTERING

Objects of research – fiber optic cable, optical reflectometer, optical tester.

The purpose of work – an analysis of the main causes and factors contributing to attenuation in optical fibers, as well as the general principles, methods, and approaches for measuring it.

Design features of optical fibers, the basic principles of light propagation within them, and the main types of optical fibers used in optical communication lines are discussed. The main factors causing losses (attenuation) in optical fibers are identified, and the basic methods and approaches for measuring them using optical testers and reflectometers are analyzed. A general methodology for analyzing and evaluating the dynamic range of an OTDR is proposed.

ЗМІСТ

С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 9
ВСТУП 10
1 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ, ТИПИ ТА ПРИНЦИПИ ПЕРЕДАЧІ СВІТЛА ПО ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ 13
1.1 Конструкція та принцип функціонування волоконного світловода 13
1.2 Типи променів, що розповсюджуються по світловоду 17
1.3 Типи волоконних світловодів залежно від кількості мод 19
1.3.1 Багатомодові волоконні світловоди 20
1.3.2 Одномодові волоконні світловоди 23
1.4 Числова апертура волоконних світловодів 26
2 ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВТРАТ ЗА ЗАГАСАННЯМ У ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ 29
2.1 Основні типи втрат за загасанням у ВС 29
2.2 Втрати на поглинання 30
2.3 Втрати на розсіювання 32
2.4 Кабельні втрати 34
2.5 Результуюче загасання та його залежність від частоти і довжини хвилі 38
3 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЗАГАСАННЯ В ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ 41
3.1 Вимірювальне обладнання для проведення вимірювань загасання у волоконному світловоді 41
3.2 Методи вимірювання загасання, що засновані на застосуванні оптичних тестерів 42
3.2.1 Функціональні і конструктивні особливості оптичного тестера 42
3.2.2 Базові принципи і особливості вимірювання загасання у ВС методом обриву волокна 47
3.2.3 Базові принципи і особливості вимірювання загасання у ВС методом внесених втрат 49
3.3 Принципи вимірювання загасання, що засновані на використанні оптичних рефлектометрів 52
3.3.1 Функціональні і конструктивні особливості OTDR 53

3.3.2 Загальні принципи і підходи щодо проведення вимірювань втрат із застосуванням OTDR 56
4 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ТА ОЦІНКИ ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ OTDR 61
ВИСНОВКИ 68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 71
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ 74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

CWDM (Coarse WDM) – розріджене (грубе) спектральне ущільнення;

DWDM (Dense WDM) – щільне спектральне ущільнення;

ILS (Insertion Loss Method) – метод внесених втрат;

MFD (Mode Field Diameter) – діаметр поля моди;

MMF (Multi Mode Fiber) – багатомодові волоконні світловоди;

NA (Numerical Aperture) – числова апертура;

NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) – одномодове волокно з ненульовою зміщеною дисперсією;

OLTS (Optical Loss Test Set) – оптичний тестер для вимірювання втрат;

OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) – імпульсний оптичний рефлектометр у часовій області;

OTN (Optical Transport Network) – оптична транспортна мережа;

QoS (Quality of Service) – якість обслуговування;

RMS (Root Mean Square) – середньоквадратичне значення;

SMF (Single Mode Fiber) – одномодові волоконні світловоди;

SNR (Signal to Noise Ratio) – відношення сигнал/шум;

SSMF (Standard Single-Mode Fiber) – стандартне одномодове волокно з незміщеною дисперсією;

SWDM (Short Wavelength Division Multiplexing) – короткохвильове спектральне ущільнення;

WDM (Wavelength Division Multiplexing) – спектральне ущільнення каналів;

ZDSF (Zero Dispersion Shifted Fiber) – одномодове волокно зі зміщеною нульовою дисперсією.

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

БМ – базовий модуль;

ВОК – волоконно-оптичний кабель;

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;

ВС – волоконний світловод;

ДОВ – джерело оптичного випромінювання;

ЗОШ – з'єднувальний оптичний шнур;

ЗРР – зворотне Релеївське розсіювання;

ЛД – лазерний діод;

ЛФД – лавинний фотодіод;

ОМ – оптичний модуль.

ВСТУП

Волоконно-оптичні лінії зв’язку (ВОЛЗ) сьогодні є основою сучасної телекомунікаційної інфраструктури та відіграють значну роль у розвитку інформаційного суспільства. Завдяки надзвичайно широкій смузі пропускання, низькому рівню власних втрат, високій завадостійкості та можливості передачі інформації на значні відстані волоконні світловоди (ВС) стали базовим фізичним середовищем для побудови магістральних оптичних транспортних мереж (Optical Transport Network, OTN), мереж доступу, центрів обробки даних хмарних провайдерів і, навіть, систем мобільного зв’язку нового покоління, з’єднуючи широкосмуговими високошвидкісними оптичними каналами базові станції з центральними комутаційними вузлами операторів мобільного зв’язку, забезпечуючи передачу великих потоків даних з мінімальними втратами [1, 2]. Таким чином, саме використання волоконно-оптичних технологій забезпечило стрімке зростання обсягів передачі даних, впровадження хмарних сервісів, мультимедійних платформ, технологій Інтернету речей та інших сучасних інфокомунікаційних рішень. Особливо важливого значення ВОЛЗ набули в магістральних OTN, де є потреба у забезпеченні передачі великих потоків інформації на значні відстані із гарантованими показниками якості обслуговування (Quality of Service, QoS) [3, 4].

У зв’язку з постійним зростанням вимог до швидкості, надійності та пропускної здатності мереж питання контролю параметрів оптичного тракту стає одним із важливіших для вирішення при проєктуванні, будівництві та експлуатації сучасних систем зв’язку. Незважаючи на значні переваги ВС як середовища передачі інформації, досить часто спостерігається погіршення якості оптичного сигналу у процесі розповсюдження, що викликане впливом на нього загасання. Треба зазначити, що загасання є одним із найважливіших факторів, що визначають ефективність і якість функціонування ВОЛЗ. Воно призводить до зменшення потужності оптичного сигналу на приймальному кінці лінії, що, у свою чергу, може спричинити погіршення співвідношення сигнал/шум, збільшення імовірності виникнення помилок при передачі даних, зменшення дальності зв’язку між вузлами мережі, що у свою чергу буде потребувати використання додаткових підсилювачів або регенераторів [5, 6].

Основними причинами виникнення загасання в оптичних волокнах є втрати на поглинання та розсіювання світлового випромінювання в матеріалі світловоду, втрати внаслідок макро- та мікровигинів волокна, а також додаткові втрати на роз'ємних і нероз'ємних з'єднаннях. Крім того, на практиці рівень загасання може суттєво зростати через відхилення геометричних параметрів волокна, порушення технології монтажу і прокладання волоконно-оптичного кабелю (ВОК), забруднення оптичних конекторів, механічні пошкодження кабельної інфраструктури та, навіть, вплив навколишнього середовища. Особливо критичним вплив загасання стає в магістральних транспортних мережах, де навіть незначне перевищення нормативних значень втрат може призвести до погіршення експлуатаційних характеристик каналу зв'язку та зниження ефективності використання мережевих ресурсів [2, 6].

Для забезпечення стабільної роботи ВОЛЗ необхідно не лише враховувати причини виникнення загасання у ВС, але й також вживати заходів щодо його зменшення. Це передбачає застосування якісних компонентів, дотримання вимог до монтажу та експлуатації оптичних кабелів, а також постійний контроль стану оптичного тракту. Відповідно з цим, з точки зору технічної експлуатації ВОЛЗ, є постійний моніторинг і контроль рівня загасання та його відповідності встановленим нормативним вимогам [5, 6].

Забезпечення ефективного моніторингу і контролю загасання неможливо без проведення відповідних вимірювань. Саме результати вимірювань дозволяють оцінити технічний стан оптичної лінії, своєчасно виявити дефекти та пошкодження, перевірити якість виконаних монтажних робіт і прогнозувати подальшу надійність функціонування мережі. Крім того, вимірювання загасання є обов'язковою процедурою під час введення ВОЛЗ в експлуатацію, проведення регламентних робіт та пошуку несправностей у процесі функціонування систем зв'язку [5].

На сьогодні для визначення загасання у ВС застосовуються різні методи та підходи щодо проведення вимірювань. Одним із найбільш поширених є метод внесених втрат, який передбачає порівняння потужності оптичного сигналу на вході та виході ділянки ВС, що досліджується. Цей метод характеризується відносною простотою реалізації та широко використовується під час побудови ВОЛЗ. Іншим важливим методом вимірювання загасання є використання оптичних рефлектометрів (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR), принцип роботи яких ґрунтується на аналізі імпульсного оптичного сигналу та реєстрації

випромінювання, що повертається внаслідок відбиття і розсіювання світла вздовж оптичного волокна. Рефлектометри дозволяють не лише визначати повні втрати за загасанням в оптичній лінії, але й також локалізувати місця виникнення додаткових втрат на роз'ємних та нероз'ємних з'єднаннях або у випадку механічних пошкоджень і дефектів оптичного кабелю [5 - 7]. Важливість застосування зазначених методів і підходів проведення вимірювань загасання, а також багатьох інших, полягає в тому, що вони забезпечують більш/менш об'єктивну оцінку стану оптичних ліній зв'язку та дозволяють підтримувати необхідний рівень якості передачі інформації.

Звідси метою цієї кваліфікаційної бакалаврської роботи є аналіз основних причин і факторів виникнення загасання в світловодах, а також загальних принципів, методів і підходів щодо проведення його вимірювання з метою здійснення оцінки технічного стану оптичної лінії зв'язку та забезпечення потрібних якісних показників оптичного сигналу у процесі передачі інформації. Актуальність такого аналізу зумовлена тим, що правильно налагоджений процес вимірювання загасання є важливою складовою системи технічного контролю і моніторингу ВОЛЗ та необхідною умовою їх надійної і ефективної експлуатації.

1 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ, ТИПИ ТА ПРИНЦИПИ ПЕРЕДАЧІ СВІТЛА ПО ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ

1.1 Конструкція та принцип функціонування волоконного світловода

Волоконний світловод є головним елементом ВОК, по якому здійснюється передача мікронних довжин хвиль, що відповідає діапазону частот $10^{14}…10^{15}$ Гц. Він, як правило, має двошарову конструкцію і складається з серцевини та оболонки з різними показниками заломлення n_1 і n_2 (рис. 1.1). Серцевина служить для передачі електромагнітної енергії (на робочих довжинах хвиль), а оболонка – для створення кращих умов відбиття на границі розділу «серцевина-оболонка», захисту серцевини ВС від механічних пошкоджень, а також для захисту від випромінювання енергії в навколишній простір і поглинання небажаного випромінювання із зовні. Класичним матеріалом для виготовлення ВС є плавлений кварц (так зване кварцове скло), який являє собою високочистий аморфний (склоподібний) діоксид кремнію (SiO_2). Ззовні поверх оболонки для захисту від проникнення вологи наносять спеціальний полімерний лак, а також інші захисні покриття (наприклад, епоксиакріолат), які підвищують міцність і гнучкість ВС [8 - 11].

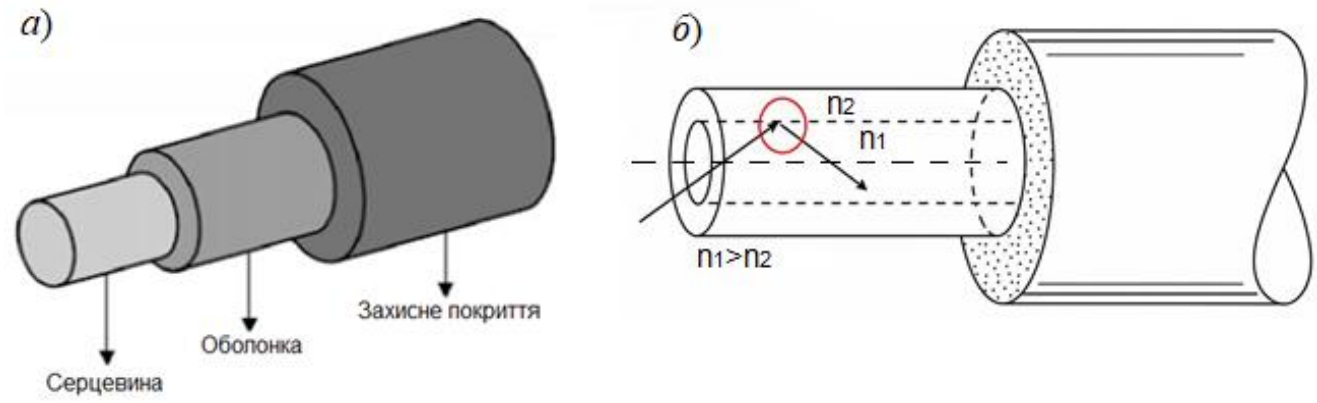


Рисунок 1.1 – Конструкція (*а*) та принцип функціонування (*б*) ВС

Оптичні властивості кварцового скла та інших подібних прозорих речовин характеризує параметр, що називається показником заломлення (*n*). Зокрема він визначає ступінь зменшення швидкості поширення світла в оптичному середовищі порівняно з вакуумом, тобто фактично характеризує щільність

речовини. Чисельно він дорівнює як відношення швидкості світла у вакуумі (c) до швидкості світла в даному середовищі (v) [8, 11]:

$$n = c/v. \quad (1.1)$$

Також показник заломлення має залежність від параметрів середовища і в цьому випадку його можна обчислити по формулі [8]:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}, \quad (1.2)$$

де ε – відносна діелектрична проникність оптичного середовища;

μ – відносна магнітна проникність середовища.

Оскільки для прозорих діелектричних матеріалів μ зазвичай є постійною величиною і дорівнює одиниці, то значення показника заломлення визначається переважно електричними властивостями середовища. Зокрема для серцевини він буде визначатися як: $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$, а для оболонки відповідно: $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$. Треба зазначити, що n_2, як правило, є постійним. Водночас у серцевині значення n_1 може бути як постійним, так і змінюватися залежно від відстані до осі ВС. Іншими словами, у загальному випадку показник заломлення серцевини є функцією поперечної координати та змінюється вздовж діаметра поперечного перерізу світловоду. Характер розподілу показника заломлення в поперечному перерізі ВС називають профілем показника заломлення. Він визначає умови поширення світлових хвиль у волокні, впливає на його параметри передачі та є однією з основних ознак класифікації ВС. Залежно від закону зміни показника заломлення розрізняють світловоди зі східчастим і градієнтним профілем показника заломлення (рис. 1.2) [8, 11].

У ВС зі східчастим профілем показника заломлення його значення для серцевини (n_1) є постійним по всьому її поперечному перерізу. Показник заломлення оболонки (n_2) також залишається постійним, проте його значення є меншим, ніж у серцевини. На границі «серцевина-оболонка» відбувається різка (східчаста), зміна показника заломлення, що і визначає назву даного типу світловоду. Різниця між n_1 і n_2 зазвичай є незначною і підбирається таким чином, щоб забезпечити умови повного внутрішнього відбиття світлових променів на границі «серцевина-оболонка», тобто має виконуватися умова $n_1 > n_2$. Саме завдяки

виконання даної умови оптичне випромінювання утримується в серцевині та може поширюватися вздовж волокна з мінімальними втратами [8].

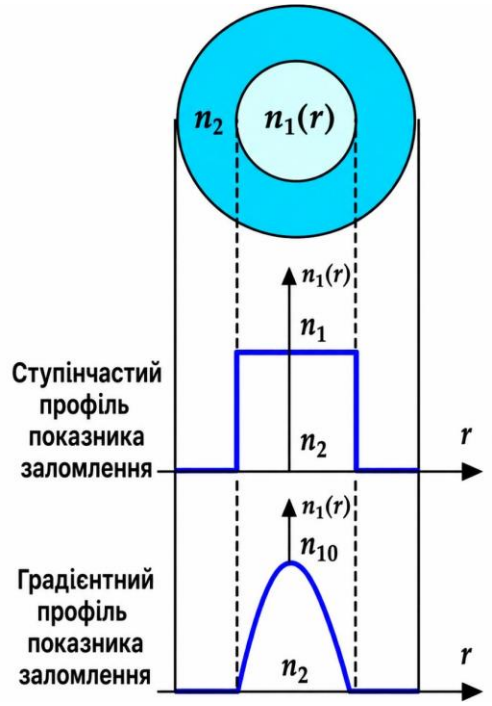


Рисунок 1.2 – Профілі показника заломлення східчастого та градієнтного типу

Східчасте волокно не може використовуватися в оптичних трактах, де потрібно забезпечити передачу даних на високих швидкостях. Це пов’язано з тим, що воно має постійний коефіцієнт заломлення по всьому перерізу серцевини, що у свою чергу спричиняє значне модове розсіювання. Для вирішення цієї проблеми були розроблені ВС із градієнтним профілем показника заломлення [2, 3].

У градієнтних ВС значення n_1 не є постійним, а плавно зменшується від її центра до границі з оболонкою (рис. 1.2). Такий профіль формується завдяки спеціальній структурі серцевини, яка складається з великої кількості концентричних шарів скла з різними оптичними властивостями. При віддаленні від осі волокна кожний наступний шар має дещо менший показник заломлення у порівнянні з попереднім, але при цьому все одно має виконуватися умова $n_1 > n_2$. Внаслідок поступової зміни показника заломлення світлові промені поширюються в такому волокні не прямолінійно і не за рахунок багаторазових відбиттів від границі «серцевина-оболонка», як у східчастих ВС. Під дією явища рефракції (тобто заломлення) їх траєкторія набуває плавної криволінійної форми, яка за своїм характером наближається до синусоїдальної (рис. 1.3) [8].

Особливістю такого механізму поширення є те, що промені, які проходять більший геометричний шлях, значну частину часу перебувають у периферійних областях серцевини, де показник заломлення є меншим. Оскільки швидкість поширення світла обернено пропорційна показнику заломлення, у цих областях світловий сигнал поширюється швидше. Саме завдяки цьому у багатомодових ВС із градієнтним профілем показника заломлення частково компенсується різниця в часі проходження різних мод (хвиль), що дозволяє суттєво зменшити міжмодову дисперсію та покращити характеристики передачі [8].

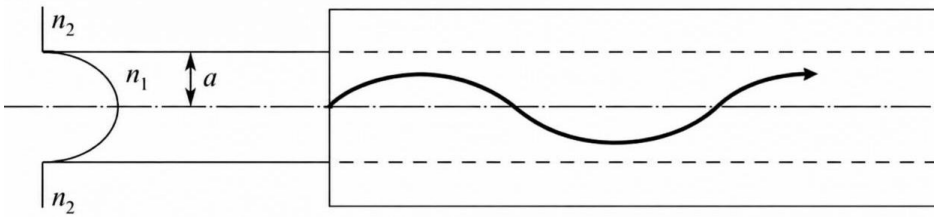


Рисунок 1.3 – Розповсюдження світлового променю у градієнтному ВС

В основі функціонування ВС, як вже вище зазначалося, лежить явище повного внутрішнього відбиття, яке виникає на границі двох діелектричних середовищ з різними показниками заломлення, тобто на границі «серцевина-оболонка», причому $n_1 > n_2$. Фізична сутність цього явища пояснюється законом Снелліуса, відповідно до якого відношення синуса кута падіння світлового променю до синуса кута його заломлення визначається співвідношенням показників заломлення двох середовищ [8, 9, 11]:

$$\frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow \quad n_1 \sin\varphi_1 = n_2 \sin\varphi_2, \tag{1.3}$$

де φ_1 і φ_2 – кути падіння і, відповідно, заломлення.

Далі для більш детального аналізу функціонування ВС розглянемо випадок розповсюдження світла із середовища з більшим показником заломлення (n_1) в середовище з меншим показником заломлення (n_2), і що відбувається при цьому при досягненні границі «серцевина-оболонка» (рис. 1.4) [8, 11].

Згідно із законом (1.3), у разі здійснення переходу світлового променю із середовища n_1 в середовище n_2, кут заломлення (φ_2) є більшим за кут падіння (φ_1). Тому із збільшенням кута φ_1 відповідно збільшується і кут φ_2, причому останній

досягне значення 90° раніше. Кут падіння, при якому заломлений промінь розповсюджується вздовж границі середовищ «серцевина-оболонка», тобто коли φ_2 стає рівним 90°, називається критичним кутом або кутом повного внутрішнього відбиття (φ_c). Цей кут можна визначити із виразу для закону Снелліуса (1.3) з урахуванням того, що $\varphi_2 = 90^0$ [8, 11]:

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow \quad \varphi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \tag{1.4}$$

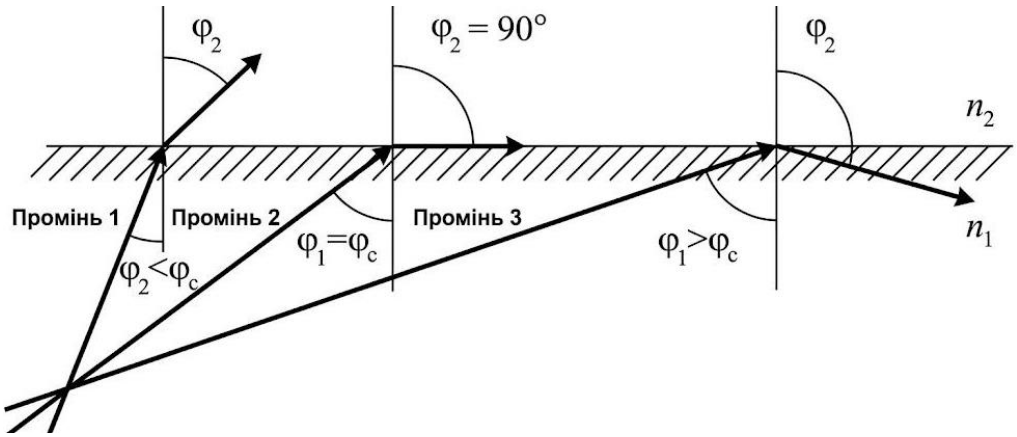


Рисунок 1.4 – Розповсюдження оптичних променів у середовищах ВС при різних кутах φ_1

Якщо кут φ_1 стає більшим за критичний кут, то світловий промінь уже не проникає в оболонку. У цьому випадку вся енергія оптичного випромінювання відбивається назад у серцевину ВС. Це явище називається повним внутрішнім відбиттям і саме воно є основою принципу функціонування ВС [8, 11].

1.2 Типи променів, що розповсюджуються по світловоду

Залежно від кута (φ), під яким світлові промені вводяться у ВС відносно його осі, у світловоді можуть розповсюджуватися три основні їх типи: випромінюючі (1), випливаючі (2) і направляючі (3) (рис. 1.5) [8, 11].

Промінь (1) не задовольняє умовам поширення в ВС та випромінюється з оболонки за його межі. Такі випромінюючі промені виникають у місцях

геометричного або фізичного відхилення структури ВС від ідеальної кругової симетрії. Промінь (2) падає на границю «серцевина-оболонка» під кутами $\varphi < \varphi_c$ і тому частково утримується в структурі світловода, але випливають у оболонку де у процесі поширення поступово втрачають свою енергію і з часом зовсім там зникають. Промінь (3) падає на границю «серцевина-оболонка» під кутами $\varphi \geq \varphi_c$, тобто процес його поширення вздовж серцевини ВС відповідає принципам явища повного внутрішнього відбиття. Тому такий промінь називається направляючим і саме такі промені забезпечують ефективну передачу оптичних сигналів на значні відстані по волокну. Відповідно, випромінюючі та випливаючі промені, що не утримуються в серцевині волокна, призводять до додаткових втрат оптичної потужності, тому вони є паразитними.

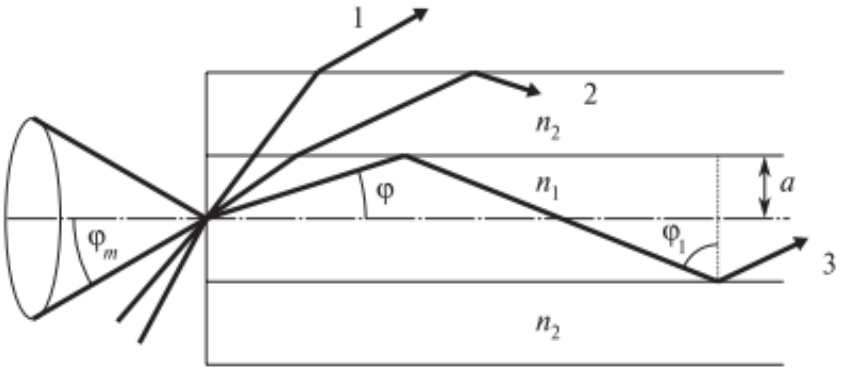


Рисунок 1.5 – Розповсюдження світлових променів різних типів у ВС

Направляючі промені характеризуються певною траєкторією поширення всередині оптичного світловода. Залежно від характеру цієї траєкторії розрізняють меридіанні та косі промені. Меридіанними називають ті промені, траєкторія яких проходить через оптичну вісь світловоду між сусідніми точками відбиття. Якщо ж траєкторія променю не перетинає вісь волокна, такий промінь називають косим. Треба зазначити, що тип направляючих променів, що поширюються у ВС, залежить від розташування джерела введення оптичного випромінювання. Якщо точкове джерело світла розташоване на осі ВС, то у світловоді будуть формуватися лише меридіанні промені. У випадку зміщення джерела випромінювання відносно осі або використання складнгого джерела випромінювання, тоді одночасно можуть поширюватися як меридіанні промені, так і косі [11].

Меридіанні промені (1) характеризуються кутом падіння (φ_1) на границю «серцевина-оболонка». Послідовно між точками відбиття вони поширюються прямолінійними ділянками, а напрямок променю після його відбиття визначається за описаним вище законом Снелліуса. Таким чином траєкторія такого променю буде знаходитися в площині, яка проходить через вісь ВС, і буде мати виражений зигзагоподібний вигляд (рис. 1.6) [11].

На відміну від них, косі промені (2) поширюються по складнішій просторовій траєкторії, яка має спіралеподібний характер навколо осі ВС. Тут для повного опису такого променю недостатньо знати лише кут φ_1. Додатково для визначення косого променю використовується так званий «кут скосу», який характеризує орієнтацію траєкторії променю, тобто його скіс відносно границі «серцевина-оболонка». Іншими словами він визначається як кут φ_{2k} у площині перетину серцевини між дотичною до границі «серцевина-оболонка» та проекцією траєкторії променю [11].

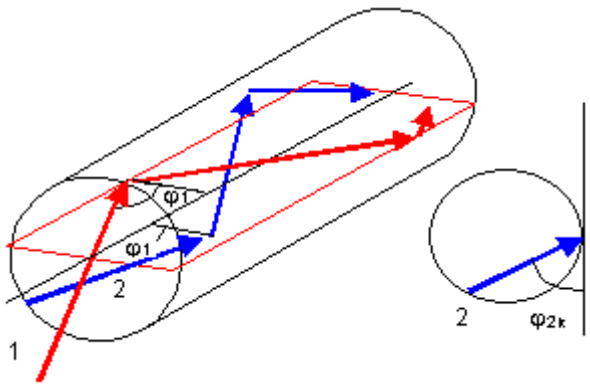


Рисунок 1.6 – Направляючі меридіанні (1) та косі (2) промені

1.3 Типи волоконних світловодів залежно від кількості мод

Залежно від діаметра серцевини світловода, його показників n_1 і n_2 у ВС може поширюватися лише одна або кілька мод випромінювання. Мода – це елементарна складова, що являє собою окремий промінь, з якого складається оптичне випромінювання, яке розповсюджується по світловоду. З точки зору геометричної оптики, мода описує траєкторію розповсюдження світла у ВС, тому схематично, зазвичай у його поперечному перерізі, моди показують окремими променями, що

поширюються у волокні під кутом до оптичної осі. При цьому промінь, який геометрично збігається з віссю волокна, називають першою або основною модою, а всі інші – бічними модами [12].

На рис. 1.7 показано, що у світловоді з малим діаметром серцевини можна ввести лише одну моду, тоді як більший діаметр дозволяє уводити кілька мод. Звідси ВС розділяють на [11, 12]:

- багатомодові (Multi Mode Fiber, MMF);
- одномодові (Single Mode Fiber, SMF).

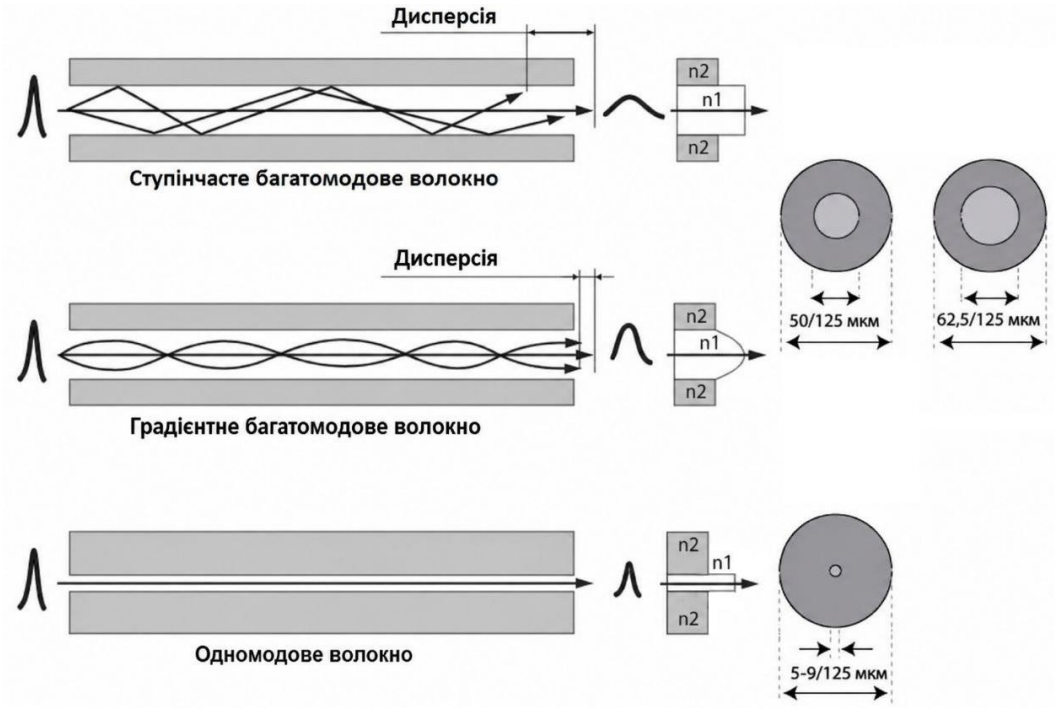


Рисунок 1.7 – Типи волоконних світловодів залежно від кількості мод та їх геометричні характеристики

1.3.1 Багатомодові волоконні світловоди

Волокна MMF можуть передавати оптичне випромінювання у всіх 3-х вікнах прозорості, у яких працюють всі оптичні системи зв’язку (більш детально вони будуть розглянуті у другому розділі), але на практиці використовуються у 1-му та 2-му вікнах. Однак використання цих вікон прозорості накладає значні обмеження на ширину смуги пропускання, у зв’язку з чим в оптичних лініях на основі MMF практично не зустрічається спектральне ущільнення. Лише у 2016 році були

випущені багатомодові ВС з пропускною здатністю, що була достатньою для застосування такого ущільнення. Зокрема за рахунок такого типу MMF у першому вікні прозорості з'явилася можливість організувати систему короткохвильового спектрального ущільнення (Short Wavelength Division Multiplexing, SWDM) у діапазоні 846 - 953 нм на 4 довжинах хвиль: 850, 880, 910 та 940 нм [13].

Також у разі використання MMF треба мати на увазі, що діаметр серцевини тут у двічі перевищує довжину світлової хвилі, що надає можливість оптичному випромінюванню розповсюджуватися одночасно за кількома незалежними одна від одної модами. Тому що різні моди мають різну довжину хвилі, то оптичний сигнал до приймача надходитиме не одночасно, що спричиняє виникнення міжмодової дисперсії.

На цей час волокна MMF описуються у різних стандартах, де визначається їх 5-ть основних категорій (наприклад, стандарт ISO/IEC 11801). Ці категорії позначаються як OM (Optical Multimode) та цифрою, що вказує на відповідний клас ВС. Кожен клас описує геометричні параметри ВС та можливості і особливості його застосування. Зокрема, найпоширеніший на сьогодні діаметр оболонки волокон MMF становить 125 мкм, однак також випускаються волокна з діаметром 250 мкм. Діаметр серцевини MMF становить 62,5 мкм для категорії OM1 і 50 мкм для категорій OM2 - OM5. Також треба зазначити, що всі категорії багатомодових волокон можуть виготовлятися із східчастим або градієнтним профілем показника заломлення (рис. 1.7). Надамо стислу характеристику цим категоріям OM [12, 13]:

- волокна категорії OM1, як зазначалося вище, мають діаметр серцевини 62,5 мкм. Первісно, коли лазери ще не були широко розповсюджені для введення оптичного випромінювання у ВС за рахунок значної вартості і низької технологічності, наявність більшого діаметру серцевини давала змогу підвищити ефективність використання світлодіодів, як джерел оптичного випромінювання. Світловоди значно простіші у використанні, але характеризуються значним розсіюванням світлового потоку. Також при цьому зростала кількість мод, що поширювалися по світловоду, а це, у свою чергу, негативно впливало на параметри передачі. Тому, коли на зміну світлодіодам почали застосовувати вузькоспрямовані лазери, діаметр серцевини MMF було зменшено до 50 мкм для зменшення кількості поширюваних мод [12].

Крім того особливістю волокон OM1 є підтримка пропускної здатності порядку 100 Мбіт/с на відстань до 2-х км. Ці волокна працюють на довжинах

хвиль 850 та 1300 нм. Але на цей час ця категорія волокон вважається застарілою і практично не використовується;

- волокна категорії OM2 застосовуються для передачі інформації на швидкості 1,25 Гбіт/с на відстань до 550 м, за потреби можуть підтримувати швидкість 10 Гбіт/с на відстані до 82 м. Ці волокна також працюють на довжинах хвиль 850 та 1300. Для маркування використовується оболонка, що має оранжевий колір;

- волокна категорії OM3 дозволяють організувати передачу потоків за технологією 10 Gigabit Ethernet на відстань до 300 м у 1-му вікні прозорості (λ = 850 нм). Для маркування використовується оболонка, що має синій колір;

- волокна категорії OM4 оптимізовані для функціонування із поверхнево-випромінюючими лазерами з вертикальним резонатором (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL), що працюють на довжині хвилі 850 нм. Ця категорія волокон MMF є найбільш затребуваною на сьогодні Такі волокна застосовуються, наприклад у центрах обробки і зберігання даних, для передачі оптичних сигналів зі швидкістю 40 Гбіт/с (на 350 м) та 100 Гбіт/с (на відстань до 100 м). Для маркування використовується оболонка, що має фіолетовий колір;

- волокна категорії OM5 оптимізовані для застосування в оптичних лініях спектрального ущільнення за технологією SWDM. Зокрема тут можлива передача потоків зі швидкістю 100 Гбіт/с (на всіх чотирьох зазначених вище довжинах хвиль по 25 Гбіт/с на відстань порядку 150 м) і зі швидкістю 40 Гбіт/с (на всіх чотирьох довжинах хвиль по 10 Гбіт/с на відстань до 440 м). Для маркування використовується оболонка, що має яскраво-зелений колір.

Треба зазначити, що найсуттєвішим недоліком багатомодових світловодів є наявність міжмодової дисперсії, яка виникає через поширення різних мод різними траєкторіями та з різною швидкістю значно знижує дальність розповсюдження оптичного сигналу без його регенерації, а також його швидкість. Усунення цього явища у сучасних ВОЛЗ вдалося досягти шляхом переходу до використання одномодових волоконних світловодів, в яких поширюється лише одна основна мода. Крім того довжину ВОЛЗ на багатомодовому волокні також обмежує загасання, яке у порівнянні із SMF має значну величину (порядку 1,5 -3,5 дБ/км) [12].

1.3.2 Одномодові волоконні світловоди

Волокна SMF також можуть працювати у всіх 3-х вікнах прозорості, але за рахунок того, що у таких ВС розповсюджується тільки одна оптична мода – в них відсутня міжмодова дисперсія, завдяки чому вони мають дуже велику ширину смуги пропускання, і тому на практиці застосовуються для організації оптичних світловодних трактів у 2-му та 3-му вікнах прозорості. Зокрема ширина смуги пропускання таких ВС складає від 1260 нм до 1620 нм, що дозволяє їх використовувати різними системами спектрального ущільнення каналів (Wavelength Division Multiplexing, WDM), які забезпечують передачу оптичних сигналів на різних довжинах хвиль в одному волокні. Наприклад, в системах грубого WDM (Coarse WDM, CWDM) використовується до 18-ти довжин хвиль із кроком 20 нм між ними у діапазоні 1270 - 1610 нм. А системи щільного WDM (Dense WDM, DWDM можуть забезпечити передачу оптичних сигналів по 41, 81 та, навіть, 160-ти оптичним каналам з кроками між ними відповідно 0,8 / 0,4/ 0,2 нм в діапазоні 1530 - 1625 нм. За рахунок того, що по кожному оптичному каналу можна забезпечити швидкість передачі порядку 10 Гбіт/с, то у цілому значно підвищується загальна пропускна здатність світловода, а значить і ефективність їх експлуатації. Крім того, величина загасання у SMF, як вище вже зазначалося, у декілька разів менше (порядку 0,2 - 0,7 дБ/км), ніж у MMF, що також сприяє здійсненню передачі інформації на значні відстані з високою швидкістю без застосування ретрансляторів для відновлення сигналу. Наприклад, у ВОЛЗ на основі технології DWDM може складати від 200 - 250 км [7, 12, 13].

Якщо подивитися на геометричні параметри SMF, то тут їх особливістю є те, що діаметр серцевини в них для підтримки одномодового режиму не набагато більший ніж робоча довжина хвилі, на якій здійснюється передача оптичних сигналів. Зокрема у сучасних стандартних SMF діаметр серцевини може бути від 5 до 10 мкм, а робочі λ для 2-го та 3-го вікон прозорості відповідно становлять 1310 нм (1,31 мкм) та 1550 нм (1,55 мкм). Діаметр оболонки в таких світловодах зазвичай такий же, як і в MMF, тобто 125 мкм. Крім того стандартне SMF має профіль показника заломлення близький до ступінчатого (рис. 1.7). Для одномодового світловода ступінчастий профіль показника заломлення є цілком припустимим, тому що в ньому поширюється лише одна мода [8 - 13].

Крім того, волокна SMF вимагають високої прецизійності при здійсненні введення оптичного випромінювання, а також у разі їх з'єднання між собою, що зумовлює їх значно вищу вартість порівняно з MMF, а також значно вищу вартість обладнання, що використовується, з'єднувальних елементів та інших компонентів волоконно-оптичного тракту. До всього підвищується складність процесу монтажу та обслуговування ліній [12].

Для організації сучасних ВОЛЗ використовуються різні типи SMF, серед яких найпоширенішими з огляду на рекомендації ITU-T G.652 - 657 є наступні [12]:

- стандартне SMF з незміщеною дисперсією (Standard Single-Mode Fiber, SSMF). Основні параметри та властивості цього волокна визначені у рекомендації ITU-T G.652. Це найбільш розповсюджений тип SMF, для якого точка нульової хроматичної дисперсії знаходиться поблизу довжини хвилі 1310 нм, що відповідає 2-му вікну прозорості. Стандарт G.652 містить декілька категорій (A, B, C і D), які відрізняються окремими експлуатаційними характеристиками. Особливий інтерес становлять волокна типів G.652.C та G.652.D, для яких є характерним знижене загасання в області так званого «водного піка» (1383 нм). Завдяки цьому вони можуть ефективно використовуватися в системах спектрального ущільнення CWDM і часто називаються всехвильовими волокнами (All-Wave Fiber);

- SMF з нульовим зміщенням дисперсії (Zero Dispersion-Shifted Fiber, ZDSF). Основні параметри та властивості цього волокна визначені у рекомендації ITU-T G.653. Завдяки зміні профіля показника заломлення вдалося точку нульової хроматичної дисперсії змістити в область 3-го вікна прозорості на довжину хвилі близько 1550 нм. Це дозволило, з одного боку, збільшити дальність передачі сигналу в цьому спектральному діапазоні. Однак використання таких волокон у сучасних системах DWDM не є прийнятним через посилення нелінійних ефектів, зокрема чотирихвильового змішування, що негативно впливає на якість передачі багатоканальних сигналів. Тому SMF такого типу використовуються тільки за кордоном в оптичних трактах, в яких не застосовуються технології спектрального ущільнення;

- SMF зі зміщеною довжиною хвилі відсічення. Основні параметри та властивості цього волокна визначені у рекомендації ITU-T G.654. Воно оптимізоване для роботи в області довжини хвилі 3-го вікна прозорості та характеризується дуже низьким рівнем загасання (менше 0,18 дБ/км). Таке значення досягається завдяки використанню кварцового скла, що має надвисокий ступень очищення та завдяки збільшенню довжини хвилі відсічення, що додатково знижує чутливість світловода

до втрат на вигинах. Такого типу SMF широко застосовуються в магістральних наземних лініях зв’язку та підводних кабельних системах для передачі інформації на великі відстані з можливістю застосування оптичних підсилювачів (ОП). Недоліком є складність технології виробництва та висока вартість;

- SMF з ненульовою зміщеною дисперсією (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF). Основні параметри та властивості цього волокна визначені у рекомендації ITU-T G.655. Таке волокно призначене для роботи в області довжини хвилі 1550 нм 3-го вікна прозорості та оптимізоване для використання в системах спектрального ущільнення DWDM. На відміну від SMF за стандартом G.653, коефіцієнт хроматичної дисперсії тут має невелике, але ненульове значення в діапазоні 1530 - 1565 нм, що дозволяє зменшити вплив нелінійних ефектів і забезпечити стабільну роботу DWDM-систем;

- SMF з ненульовою зміщеною дисперсією для широкосмугової передачі. Основні параметри та властивості цього волокна визначені у рекомендації ITU-T G.656. За своїми характеристиками світловоди цього типу є подібними до SMF за стандартом G.655, однак ненульове значення дисперсії тут забезпечується в більш широкому діапазоні довжин хвиль – від 1460 до 1625 нм. Завдяки цьому такі волокна можуть ефективно використовуватися як у системах DWDM, так і в системах CWDM;

- SMF зі зниженою чутливістю до макровигинів (Bend-Insensitive Fiber). Основні параметри та властивості цього волокна визначені у рекомендації ITU-T G.657. Крім оптичних параметрів, для сучасних світловодів важливими є також і механічні характеристики, зокрема такі як стійкість до вигинів, що буде аналізуватися у другому розділі. Це особливо є важливим під час прокладання ВОК у приміщеннях, кабельній каналізації та інших умовах обмеженого простору, де виникає необхідність багаторазового згинання кабелю. Рекомендація G.657 описує декілька підкласів SMF, які відрізняються один від одного допустимим мінімальним радіусом вигину та відповідними втратами на них;

Слід звернути увагу, що наведені типи SMF не завжди є взаємовиключними. Одне й те ж саме волокно може одночасно відповідати вимогам декількох рекомендацій ITU-T. Наприклад, досить широко відоме волокно Corning SMF-28® Ultra відповідає вимогам стандартів G.652.D та G.657.A1 Водночас окремі типи волокон можуть мати обмеження щодо сумісності між собою, що необхідно враховувати під час проєктування та модернізації ВОЛЗ [12].

1.4 Числова апертура волоконних світловодів

Важливою характеристикою ВС є його числова апертура (Numerical Aperture, NA), яка характеризує здатність світловоду приймати та ефективно спрямовувати оптичне випромінювання, що надходить на його вхідний торець. Іншими словами, NA визначає діапазон кутів до оптичної осі (див. рис. 1.5), під якими світло може вводитися у світловод та надалі поширюватися його серцевиною, тобто будуть задовольняти умовам повного внутрішнього відбиття. Як зазначалося, промені, що вводяться під надто великими кутами, не утримуються в серцевині, переходять в оболонку та втрачаються внаслідок поглинання або випромінювання за межі світловоду. У зв'язку з цим для кожного ВС існує граничний кут введення випромінювання φ_c, при якому світловий промінь ще може поширюватися серцевиною. Цей кут утворює так званий апертурний конус, а його граничне значення називають апертурним кутом (φ_m) (рис. 1.5 та рис. 1.8). Саме цей параметр безпосередньо пов'язаний із числовою апертурою волокна [8, 11].

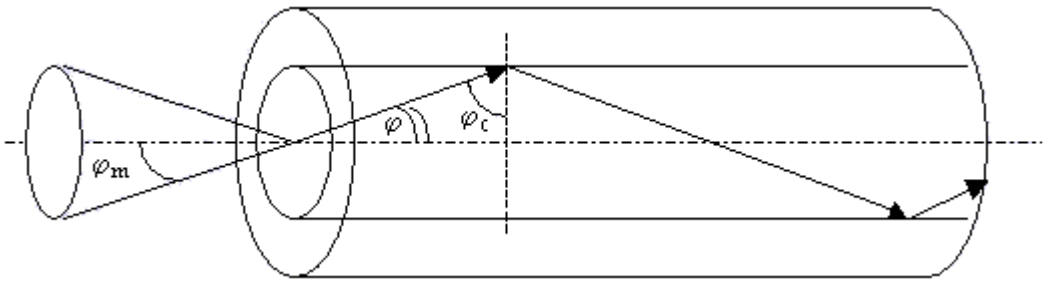


Рисунок 1.8 – Апертурний кут та визначення числової апертури

Значення числової апертури має важливе практичне значення, оскільки від нього залежать ефективність введення оптичного випромінювання від лазерів або світлодіодів у ВС, а також рівень втрат на мікровигинах, величина дисперсійних втрат сигналу, кількість мод, що можуть розповсюджуватися у серцевині волокна.

Існує декілька підходів до визначення величини числової апертури.

По-перше, значенню кута φ_m відповідає величина номінальної NA [8, 11]:

$$NA = n_0 \sin \varphi_m, \tag{1.5}$$

де n_0 – показник заломлення навколишнього середовища, який для повітря $n_0 = 1$.

По-друге, застосовуючи закон Снелліуса у вигляді: $\frac{\sin\varphi_m}{\sin\varphi} = \frac{n_1}{n_0}$, можна отримати так звану розрахункову NA для східчастого світловоду [11]:

$$\begin{aligned} NA &= n_1 \sin\varphi = n_1 \sin\left(90^0 - \varphi_c\right) = n_1\left(\sin 90^0 \cos\varphi_c - \sin\varphi_c \cos 90^0\right) = \\ &= n_1 \cos\varphi_c = n_1\sqrt{1-\sin^2\varphi_c} = n_1\sqrt{1-\frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \tag{1.6}$$

Вираз (1.6) показує, що між NA та відносною різницею показників заломлення є зв'язок, що описується співвідношенням [11]:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad \Rightarrow \quad \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1\sqrt{2\Delta} = NA \tag{1.7}$$

Тобто із співвідношення (1.7) можна бачити, що чим буде більшим у ВС значення Δ, тим більшою буде величина NA та, відповідно, тим буде легше здійснювати введення оптичного випромінювання від джерел світла у торець волокна.

По-третє, для градієнтних ВС користуються поняттям локальної NA, значення якої є максимальним на вісі волокна та спадає до «0» на границі «серцевина-оболонка», що описується наступним виразом [11]:

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}\,, \tag{1.8}$$

де $n(r)$ – це значення показника заломлення з урахуванням ступеня зміни градієнтного профілю серцевини [11]:

$$n(r) = \begin{cases} n_1\left[1 - 2\Delta(r/a)^\alpha\right]^{1/2}, & 0 \le r < a, \\ n_2, & r \ge a \end{cases} \tag{1.9}$$

де a – радіус серцевини ВС;

α – показник, що характеризує ступінь зміни градієнтного профілю, його вибирають із: $\alpha \to 2.5 - 4.2$.

У цьому випадку NA показує, що максимальний кут φ_m визначається тим, у якій точці серцевини ВС знаходиться вершина конуса. Іншими словами, захват світла волоконним світловодом буде залежати від того, у якій точці серцевини воно буде вводитися у градієнтний світловод [11].

По-четверте, для стандартного градієнтного ВС, що має параболічний профіль показника заломлення може бути визначена ефективна NA [11]:

$$NA_{eff} = \sqrt{n_1^2(0) - n_2^2} \Big/ \sqrt{2}, \tag{1.10}$$

де $n_1(0)$ – максимальне значення показника заломлення на осі.

Треба особливу увагу звернути на те, що важливою умовою зменшення втрат при з’єднанні джерела оптичного випромінювання зі світловодом є відповідність їх NA. Узгодження цих параметрів забезпечує ефективне введення світлової енергії в світловод, тоді як їх невідповідність призводить до додаткових втрат потужності та зниження ефективності передачі сигналу.

2 ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВТРАТ ЗА ЗАГАСАННЯМ У ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ

2.1 Основні типи втрат за загасанням у ВС

До найважливіших експлуатаційних параметрів волоконного світловода належать оптичні втрати та пов’язане з ними загасання сигналу, що виникає у процесі передачі оптичного випромінювання. Величина загасання безпосередньо впливає на дальність зв’язку, енергетичний потенціал лінії та загальну ефективність функціонування ВОЛЗ. Основні типи втрат за загасанням у ВС наведені на рис. 2.1. [8, 14].

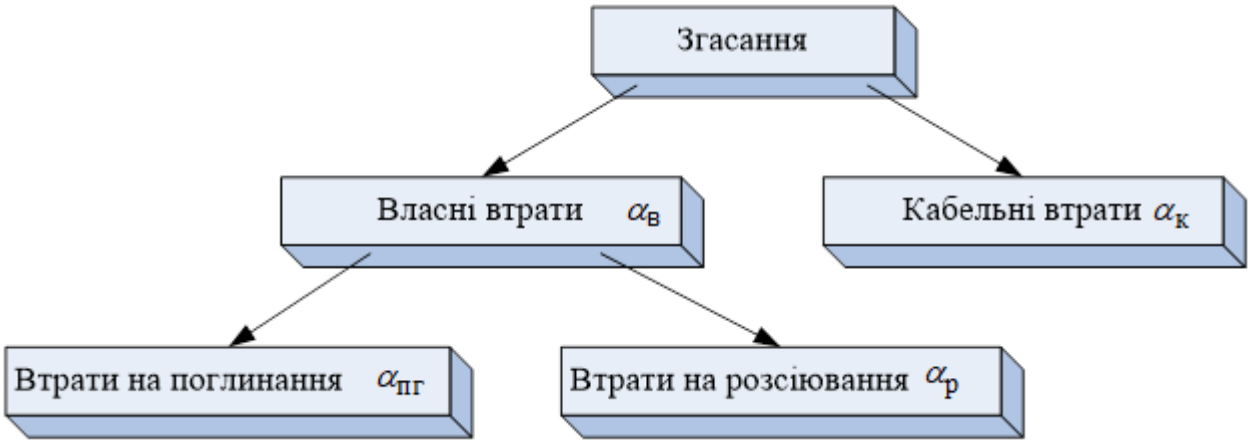


Рисунок 2.1 – Основні типи втрат за загасанням у ВС

Можна бачити, що загасання у ВС зумовлене як власними втратами ($\alpha_в$) в оптичному волокні, так і додатковими кабельними втратами ($\alpha_к$). Власні втрати пов’язані з фізичними процесами поширення оптичного випромінювання в матеріалі світловоду, тоді як додаткові втрати виникають унаслідок механічних впливів на волокно під час виготовлення та експлуатації волоконно-оптичного кабелю (ВОК). До таких впливів належать деформації, мікро- та макровигини світловодів, що можуть виникати при накладанні захисних покриттів, буферних шарів та зовнішніх оболонок кабелю. Таким чином, загальне загасання в оптичному тракті визначається сукупним впливом внутрішніх властивостей волокна та конструктивно-технологічних особливостей ВОК [6, 8]:

$$\alpha = \alpha_в + \alpha_к, \quad (2.1)$$

Власні втрати ВС формуються за рахунок двох основних складових: втрат на поглинання ($\alpha_{пг}$) та втрат на розсіювання ($\alpha_р$). Перші зумовлені поглинанням частини енергії оптичного випромінювання матеріалом волокна, а другі – розсіюванням світла на структурних неоднорідностях світловоду, що призводить до послаблення сигналу, що поширюється [6, 8]:

$$\alpha_в = \alpha_{пг} + \alpha_р. \quad (2.2)$$

Звідси, загальне загасання у ВС (вимірюється в дБ/км) визначається як сума всіх зазначених вище типів втрат [6, 8, 14]:

$$\alpha = \alpha_в + \alpha_к = \alpha_{пг} + \alpha_р + \alpha_к. \quad (2.3)$$

2.2 Втрати на поглинання

Загасання, що виникає в результаті поглинання зв’язане із втратами на діелектричну поляризацію, а також суттєво пов’язане із властивостями кварцового скла, з якого виготовляються ВС. Величина цього загасання можна визначити за формулою [8]:

$$\alpha_{пг} = 8{,}69 \frac{\pi n_1}{\lambda} tg\delta, \quad (2.4)$$

де n_1 – показник заломлення серцевини ВС;

$tg\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;

λ – робоча довжина хвилі оптичного випромінювання.

До втрат, що обумовлені фізичними властивостями матеріалу ВС належать, ультрафіолетове та інфрачервоне поглинання. Також додатково частина оптичної енергії втрачається внаслідок поглинання світла домішковими компонентами, що є наявними у склі. При цьому домішки взаємодіють з оптичним випромінюванням

на певних (властивих тільки кожній конкретній домішці) довжинах хвиль і перетворюють цю поглинуту енергію у Джоулеве тепло.

Величина втрат на поглинання залежить від робочої довжини хвилі на якій передається оптичний сигнал. В області оптичного спектра, де довжини хвиль є меншими 1,3 мкм, спостерігається зростання втрат через ультрафіолетове поглинання. Для довжин хвиль, що є більшими 1,3 мкм, починає суттєво проявлятися інфрачервоне поглинання, інтенсивність якого збільшується зі зростанням довжини хвилі. В області 1,6 мкм рівень таких втрат стає настільки значним, що прозорість звичайного кварцового скла суттєво зменшується, і ефективність передачі оптичних сигналів стає обмеженою (рис. 2.2) [8, 14].

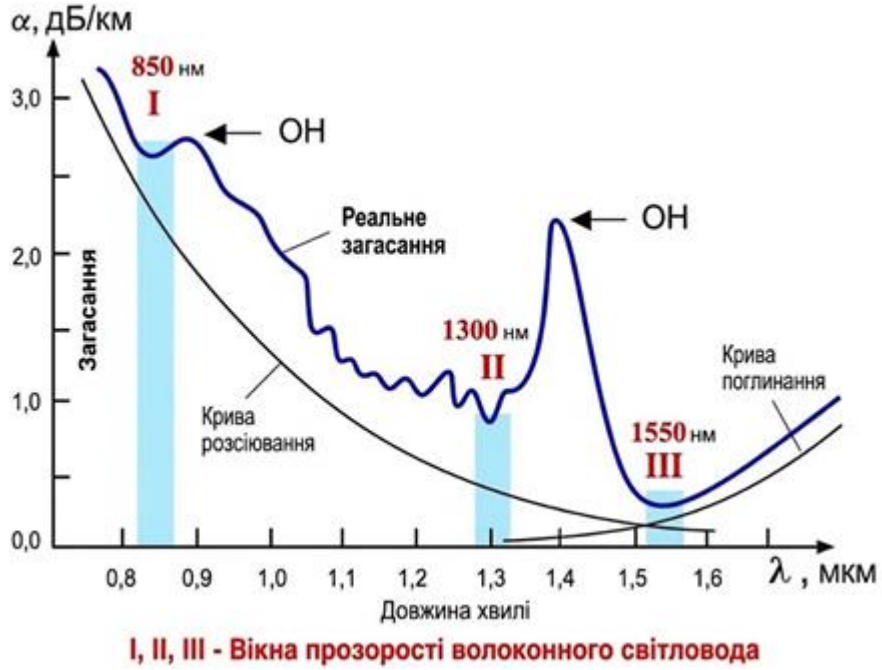


Рисунок 2.2 – Втрати у волоконному світловоді у відповідності із розташуванням його вікон прозорості

Загасання в інфрачервоній області, що розташована в діапазоні хвиль, що є більшою за 1,6 мкм, визначається як [8, 9]:

$$\alpha_{\text{іч}} = Ce^{-\frac{k}{\lambda}}, \tag{2.5}$$

де C і k – постійні коефіцієнти. Вони для кварцового скла мають значення: $C = 0{,}9$ дБ/км, k =(0,7 - 0,9) мкм.

Для зниження втрат на поглинання та формування необхідних оптичних характеристик ВС у процесі його виготовлення застосовують спеціальні легуючі добавки. Наприклад, деякі із них, наприклад, бор (B_2O_3) характеризуються вищим власним поглинанням оптичного випромінювання, тоді як інші, такі як германій (Ge_2), забезпечують менші втрати за поглинанням. Сучасні технології виробництва ВС передбачають використання легуючих добавок з мінімальним рівнем поглинання, що дозволяє отримати низькі значення загасання та підвищити ефективність передачі інформації по ВОЛЗ.

2.3 Втрати на розсіювання

У процесі поширення оптичного випромінювання у ВС частина світлової енергії зазнає розсіювання на неоднорідностях матеріалу світловоду. У результаті цього окремі світлові промені відбиваються від неоднородності і змінюють випадковим чином напрямок свого поширення під випадковими кутами. Зокрема, частина розсіяного випромінювання може поширюватися під кутами, меншими за критичний кут повного внутрішнього відбиття, внаслідок чого світло виходить із серцевини в оболонку та втрачається. А інша частина розсіяного випромінювання залишається в серцевині, але поширюється у зворотному напрямку до джерела сигналу. Такий механізм втрат є характерним для будь-якого ВС і зумовлений наявністю мікроскопічних неоднорідностей у структурі його матеріалу. Це явище отримало назву Релеївського розсіювання і також відноситься до основних складових власних втрат волоконного світловода (рис. 2.3) [8, 14].

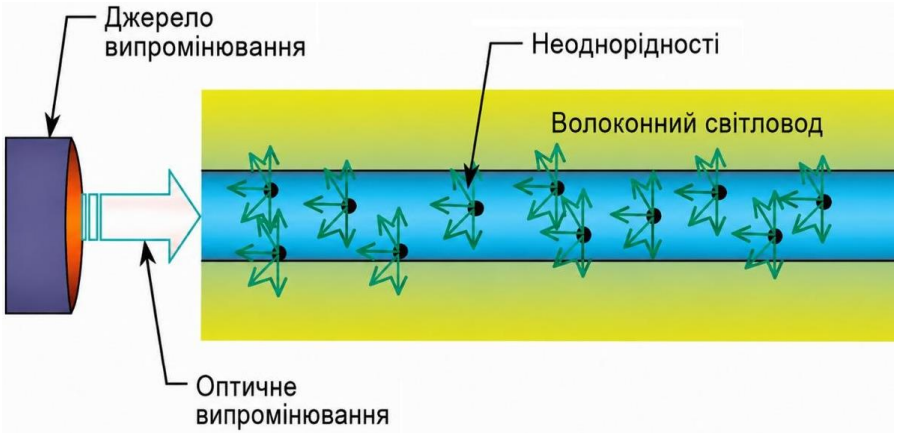


Рисунок 2.3 – Розсіювання світлової енергії у ВС

Цей тип втрат обумовлений наявністю в матеріалі серцевини ВС мікроскопічних неоднорідностей, розміри яких співрозмірні з малою частиною довжини хвилі (порядку 0,1 частки довжини хвилі) оптичного випромінювання. Такі неоднорідності спричиняють відхилення частини світлової енергії від основного напрямку поширення, що призводить до додаткового послаблення сигналу [8].

Розсіювання може бути спричинине не лише природними неоднорідностями структури кварцового скла, з якого виготовлений ВС, але й технологічними відхиленнями, що виникають у процесі виготовлення волокна. До нихналежать зміни діаметра серцевини, порушення її геометричної форми, наявність мікропорожнин у склі, дефекти на границі поділу «серцевина-оболонка», а також нерівномірний розподіл легуючих домішок у матеріалі ВС.

Слід зазначити, що легуючі добавки, які використовуються для зміни показника заломлення серцевини ВС, одночасно можуть збільшувати неоднорідність структури кварцового скла. У зв'язку з цим із зростанням відносної різниці показників заломлення (Δ) серцевини та оболонки збільшується інтенсивність Релеївського розсіювання, а відповідно і втрати оптичної потужності у ВС.

Залежність втрат, що викликані Релеївським розсіюванням, від довжини хвилі описується законом λ^{-4}. Тобто згідно з законом Релея, інтенсивність такого розсіювання обернено пропорційна четвертій степені довжини хвилі: $I \sim 1/\lambda^4$, де λ – довжина хвилі оптичного випромінювання. Звідси Згасання на розсіювання можна визначити за формулою [8, 9]:

$$\alpha_{\text{р}} = K_{\text{р}}/\lambda^4, \tag{2.6}$$

де $K_{\text{р}}$ – коефіцієнт Релеєвського розсіювання, який навіть у разі відсутності легуючих добавок, тобто для чистого кварцового скла має значення 0,75 мкм^4 ·дБ/км.

Звідси можна бачити, що зі збільшенням λ рівень втрат на Релеївському розсіюванні зменшується. Тому цей тип втрат найбільш суттєво проявляється в області коротких довжин хвиль і значно менше впливає на передачу сигналів у діапазонах 1,3 та 1,55 мкм, які широко використовуються в сучасних ВОЛЗ (рис. 1.2) [14].

2.4 Кабельні втрати

У процесі виготовлення ВОК виникають додаткові втрати, що відносять до так званих кабельних втрат, та які поділяють на втрати на макро- і мікровигинах.

1) Макровигини являють собою вигини ВОК з відносно малим радіусом кривизни, які можуть суттєво впливати на характеристики передачі сигналу. Для забезпечення надійної роботи волоконно-оптичної лінії виробники кабельної продукції вказують у технічній документації мінімально допустимий радіус вигину кабелю. Під час монтажу та експлуатації ВОЛЗ значень цього параметру необхідно суворо дотримуватися, оскільки надмірний вигин кабелю може призвести не лише до погіршення його оптичних характеристик, але й до механічного пошкодження окремих ВС. На практиці мінімально допустимий радіус вигину ВОК зазвичай становить від 10 до 30 см і залежить від його конструкції та кількості ВС. Перевищення встановлених обмежень може викликати значне збільшення загасання, а в окремих випадках – деформацію або навіть руйнування світловодів [8, 11].

Втрати на макровигинах виникають через зміну траєкторії поширення променів оптичного випромінювання в зігнутому ВС. У місцях значних вигинів частина світлової енергії перестає задовольняти умові повного внутрішнього відбиття на границі «серцевина-оболонка» та виходить за межі серцевини, що призводить до додаткового загасання сигналу. Для кращого розуміння механізму виникнення таких втрат розглянемо процес поширення світлових променів у світловоді зі східчастим профілем показника заломлення (рис. 2.4) [8, 11].

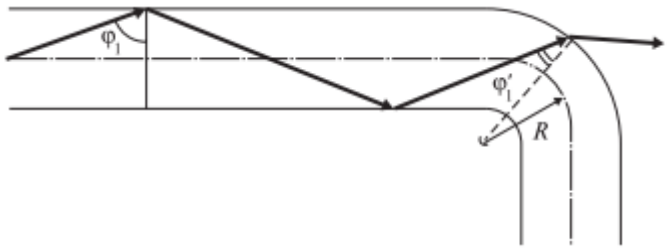


Рисунок 2.4 – Виникнення додаткових втрат на макровигинах ВОК

На вигині промінь утворить кут падіння $\varphi_1^{'} < \varphi_1$, а отже, порушується умова повного внутрішнього відбиття ($\varphi_1^{'} < \varphi_c$). Такий промінь заломлюється і

розсіюється в навколишньому просторі (перш за все у оболонці). У градієнтних MMF моди вищих порядків, що поширюються поблизу границі «серцевина-оболонка», мають малі значення кута φ_1, тому при згортанні такого світловода в коло в першу чергу будуть загублені саме ці моди [8, 11].

Загасання, що може виникнути у результаті впливу макровигинів розраховується за формулою [11]:

$$\alpha_{macroMMF} = -10\log\left\{1 - \frac{g+2}{2g\Delta}\left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{0{,}16\lambda}{R}\right)^{\frac{2}{3}}\right]\right\}, \qquad (2.7)$$

де g – коефіцієнт, що визначає вид профілю показника заломлення;

$2a$ – діаметр серцевини світловода;

R – радіус вигину.

Макровигини в SMF викликають безперервний витік потужності з моди. У цьому вмпадку загасання може бути розраховане за формулою [11]:

$$\alpha_{macroSMF} = \frac{33\Delta^{0,25}\lambda_c^{1,5}}{\sqrt{R}\lambda^2}\exp\left(-1{,}244\frac{\Delta^{1,5}}{\lambda}\left[2{,}748 - \frac{0{,}996\lambda}{\lambda_c}\right]^3 R\right), \qquad (2.8)$$

де λ_c – довжина хвилі, що відповідає значенню нормованої частоти V.

2) Суттєвим джерелом додаткових втрат у волоконному світловоді є його мікровигини. Їх виникнення пов’язане з випадковими осьовими відхиленнями у ВС, які практично неможливо повністю усунути під час виготовлення, монтажу та експлуатації ВОК. Такі деформації можуть виникати в процесі нанесення захисних покриттів, формування конструкції кабелю, а також під впливом температурних змін, що супроводжуються розширенням або стисканням як самого світловоду, так і його захисних елементів.

Характерною особливістю мікровигинів є їх незначний розмах, що зазвичай не перевищує одиниць мікрометрів, та мала протяжність, що становить менше одного міліметра. Незважаючи на незначні геометричні розміри, такі локальні деформації можуть істотно впливати на умови поширення оптичного

випромінювання у волокні та спричиняти додаткові втрати потужності сигналу. Відповідний вид додаткових кабельних втрат отримав назву втрат на мікровигинах (рис. 2.5) [8, 11].

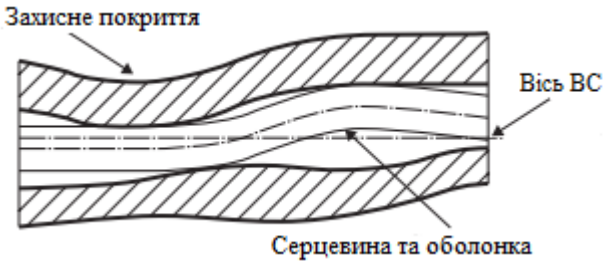


Рисунок 2.5 – Виникнення мікровигинів у разі нерівномірного накладення захисного покриття

Мікровигини викликають додаткове перетворення частини оптичної енергії в моди, які не утримуються в межах серцевини, що призводить до її виходу в оболонку та подальших втрат. Цей механізм проявляється як в одномодових, так і в багатомодових ВС. За несприятливих умов рівень таких втрат може досягати значних величин (~100 дБ/км) і суттєво погіршувати характеристики оптичної лінії зв’язку.

Для зменшення впливу мікровигинів застосовуються спеціальні технологічні рішення на етапі виготовлення ВС і ВОК. Зокрема, в одномодових волокнах конструкція світловоду підбирається таким чином, щоб основна частина енергії оптичної моди була максимально зосереджена в серцевині. Це знижує чутливість волокна до локальних деформацій та дозволяє суттєво зменшити додаткові втрати, що викликаються мікровигинами.

Втрати від мікровигинів є функцією діаметра поля моди (Mode Field Diameter, MFD), конструкції кабелю і його виконання. Втрати від загасання, викликаного мікровигинами, зменшуються з діаметром поля моди.

Діаметр модового поля, який також іноді називають діаметром модової плями, є одним із найважливіших параметрів одномодових ВС. Його використання пов’язане з особливостями поширення основної моди в світловоді. На відміну від багатомодових ВС, в одномодовому ВС оптична енергія основної моди концентрується не лише в серцевині, але й також частково проникає в прилеглу область оболонки. Тому для характеристики просторового розподілу

оптичної потужності недостатньо враховувати лише геометричний діаметр серцевини. У таких випадках більш інформативним параметром є саме діаметр модового поля, який характеризує ефективну область поширення основної моди в поперечному перерізі волокна [15].

MFD має важливе практичне значення під час з'єднання ВС між собою, а також при узгодженні волокна з джерелами та приймачами оптичного випромінювання. Від правильного узгодження даного параметра залежить рівень втрат на стиках та ефективність введення оптичної потужності у світловод. Кількісно MFD визначають як подвоєну відстань від осі волокна до точки, в якій щільність оптичної потужності зменшується у 2,72 рази відносно свого максимального значення. Іншими словами, ця межа відповідає рівню приблизно 36,8 % від максимальної щільності потужності основної моди [15].

Слід зазначити, що MFD зазвичай перевищує геометричний діаметр серцевини одномодового ВС. Його значення залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання, а також від профілю показника заломлення в світловоді [15].

У MMF мікровигини викликають перерозподіл оптичної енергії між різними модами, що поширюються поволокну. Такі втрати є пов'язаними з локальними деформаціями ВС та, та на відміну від інших видів втрат, практично не залежать від довжини хвилі оптичного сигналу. Ці втрати можна визначити за формулою [11]:

$$\alpha_{MMF\ micro} = ka^4 d^{-6} \Delta^{-3}, \tag{2.9}$$

де k – коефіцієнт, що залежить від рівня відхилення і довжини мікровигинів;

a – радіус серцевини ВС;

d – діаметр оболонки волокна.

В SMF, на відміну від MMF, втрати, що спричиняються ікровигинами, суттєво залежать від λ. Це пояснюється тим, що зі збільшенням λ змінюється структура модового поля: більша частина енергії основної моди поширюється в прикордонній області між серцевиною та оболонкою і стає більш чутливою до локальних деформацій світловоду.

У результаті навіть незначні мікровигини можуть викликати вихід частини оптичної енергії за межі області її поширення та призводити до додаткового

загасання сигналу. Тому рівень втрат на мікровигинах в одномодових ВС визначається не лише величиною механічних деформацій, але й також довжиною хвилі випромінювання, що передається. Такі втрати можна розрахувати за формулою [11]:

$$\alpha_{SSFmicro} = 2 \cdot 10^{-4} \alpha_{microMMF} \frac{\omega_0^6}{\lambda^4}, \tag{2.10}$$

де ω_0 – радіус поля моди.

З першого погляду здається, що із збільшенням λ загасання, що виникло через мікровигини буде зменшуватися. Однак, буде навпаки – втрати будуть збільшуватися, тому що із збільшенням λ буде зростати радіус поля моди, що можна бачити із виразу [11]:

$$\omega_0 = a\left(0{,}65 + 1{,}61V^{-1{,}5} + 2 < 879V^{-6}\right), \tag{2.11}$$

де V – нормована частота, яку приблизно можна визначається як: $V \approx \frac{12{,}97a\sqrt{\Delta}}{\lambda}$.

2.5 Результуюче загасання та його залежність від частоти і довжини хвилі

З вищенаведеного аналізу типів втрат у ВС видно, що із збільшенням частоти оптичного сигналу загальний рівень втрат у світловоді зростає. При цьому втрати на поглинання змінюються за законом, що є близьким до лінійного, тоді як втрати на розсіювання зростають значно швидше через їх виражений нелінійний характер. У більшості спектральних діапазонів, що використовуються в оптичному зв’язку, втрати на розсіювання є домінуючою складовою власних втрат волокна та перевищують втрати на поглинання (рис. 2.6) [11].

Із залежностей на рисунку 2.6 видно принципову різницю між характеристиками загасання симетричних (E_{01}, H_{01}) і змішаних (HE_{11}) хвиль. Симетричні хвилі мають критичну частоту f_0, нижче якої передача оптичного

сигналу неможлива. Змішана хвиля HE_{11} не має критичної частоти і загасання росте плавно по всьому частотному діапазонові [11].

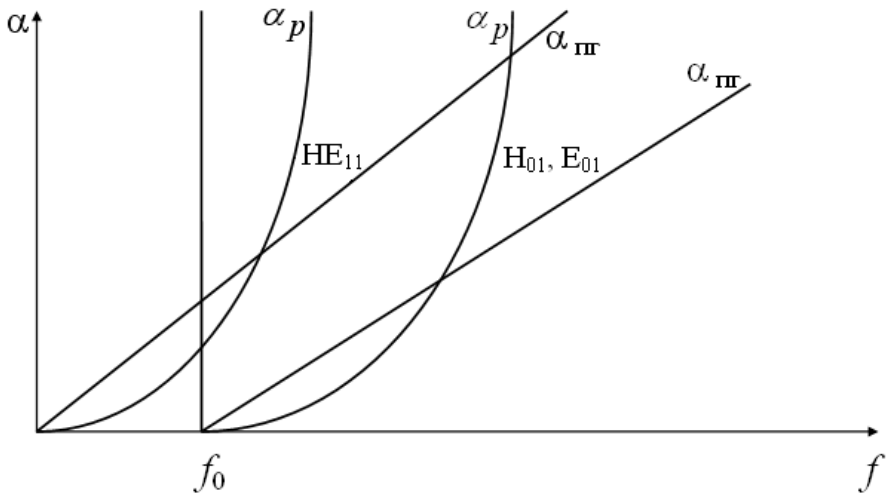


Рисунок 2.6 – Залежність загасання у світловоді від частоти

Найбільший інтерес представляє залежність результуючого загасання від довжини хвилі, яку можна побачити на рис. 2.2 (синя крива). Можна бачити, що із збільшенням λ загальний рівень загасання у ВС переважно зменшується. Проте на окремих довжинах хвиль спостерігаються локальні максимуми загасання, що пов'язані з резонансним поглинанням оптичного випромінювання гідроксильними групами (ОН), які можуть бути присутніми в структурі кварцового скла. Такі піки втрат характерні для довжин хвиль близько 0.95, 1.25 та 1.39 мкм. Крім того, на λ понад 1,6 мкм загасання, як було показано вище, починає зростати внаслідок збільшення втрат на інфрачервоне поглинання матеріалу світловоду [11].

Між зазначеними областями підвищених втрат розташовані діапазони довжин хвиль, для яких характерні мінімальні значення загасання. Ці діапазони отримали назву вікон прозорості ВС. Вони є основою для визначення робочих довжин хвиль у ВОЛЗ.

Перше вікно прозорості утворюється на довжини хвилі 0,85 мкм і характеризується загасанням приблизно 2-5 дБ/км. Друге вікно прозорості відповідає довжині хвилі близько 1,3 мкм. Тут величина загасання зменшується до 1-1,5 дБ/км. Найменші втрати спостерігаються в третьому вікні прозорості, що утворюється на довжини хвилі 1,55 мкм. Тут загасання у ВС може становити

всього 0,2-0,5 дБ/км. Тобто можна бачити, що із збільшенням номера вікна прозорості значення загасання загалом зменшується, що забезпечує можливість передачі оптичних сигналів на більші відстані без використання додаткових підсилювачів або регенераторів. Саме тому при розробці ВОЛЗ перевага надається роботі в межах цих вікон прозорості, які фактично, як зазначалося, визначають робочі діапазони довжин хвиль оптичного зв'язку [11].

На сьогодні найбільшого практичного застосування набули друге та третє вікна прозорості, оскільки вони забезпечують найменший рівень загасання, високу якість передачі сигналів і дозволяють максимально ефективно використовувати пропускну здатність оптичних ліній зв'язку. Особливо важливим є діапазон 1,55 мкм, який широко використовується в сучасних магістральних і транспортних оптичних мережах завдяки мінімальним втратам та можливості організації високошвидкісної передачі інформації на великі відстані.

3 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЗАГАСАННЯ В ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ

3.1 Вимірювальне обладнання для проведення вимірювань загасання у волоконному світловоді

Коли йдеться про проведення вимірювань у світловодах оптичних ліній, то насамперед маються на увазі вимірювання оптичних втрат (загасання). Справді, насамперед саме втрати на загасання, які безпосередньо впливають на величину втрат потужності оптичного сигналу, що поширюється у ВС, стають ключовим показником, що обмежує довжину без регенераційної ділянки лінії зв'язку. Дані, що отримані в результаті вимірювання рівня потужності сигналу в лінії, а також розуміння того, як змінюється потужність цього сигналу, дають змогу робити висновки щодо якості та ефективності функціонування ВОЛЗ. Тому для фахівців важливо знати, як правильно отримувати ці дані, вміти їх аналізувати та обробляти [16].

Перш за все треба зазначити, що для здійснення моніторингу та контролю якості оптичних ліній зв'язку шляхом вимірювання втрат зазвичай достатньо використовувати два основних типи вимірювальних приладів, зокрема оптичних тестерів (Optical Loss Test Set, OLTS), які призначені для визначення повних втрат у лінії, та оптичних імпульсних рефлектометрів у часовій області (OTDR), які дають змогу провести вимірювання розподілу втрат уздовж усієї довжини волоконного світловода [16].

Відмінність у застосуванні цих вимірювальних приладів полягає в особливостях їх застосування. Зокрема для проведення вимірювань оптичним тестером необхідно мати два прилади і забезпечити їх підключення до обох кінців оптичної лінії. Натомість рефлектометр виконує вимірювання, маючи підключення лише з одного кінця світловода. Така різниця пояснюється різними принципами проведення вимірювань оптичних втрат. Оптичний тестер зазвичай складається з 2-х приладів: джерела оптичного випромінювання та вимірювача потужності цього оптичного випромінювання. Вимірювання втрат здійснюється прямим методом: порівнюються значення оптичної потужності на вході та виході лінії. Різниця між цими значеннями, що виражається в децибелах (дБ), характеризує загальне загасання оптичного сигналу в лінії [16].

На відміну від тестера, рефлектометр використовує непрямий підхід проведення вимірювань. Прилад надсилає у ВС короткі тестові імпульси та реєструє сигнал, який повертається внаслідок зворотного розсіювання світла. Здійснюючи аналіз отриманої рефлектограми, процесор приладу визначає величину втрат у різних точках ВС та формує профіль загасання вздовж всієї оптичної лінії. Звідси такий підхід щодо визначення втрат і називають непрямим. Саме з цією похибкою непрямого підходу і пов’язують деякі наближення при здійсненні остаточного підрахунку повних втрат у волокні. Тому у разі застосування рефлектометрів точність визначення повних втрат дещо поступається прямим вимірюванням, які виконуються оптичним тестером лінії [16].

Додатковою перевагою оптичних тестерів є можливість вимірювання втрат у лініях практично будь-якої довжини, включаючи навіть дуже короткі оптичні з’єднувальні шнури. Рефлектометри, навпаки, мають обмеження у разі проведення вимірів коротких ділянок волокна, оскільки такі відрізки волокна можуть потрапити до так званих мертвих зон приладу.

Ці та інші особливості зазначених вимірювальних приладів та їх вплив на результати вимірювань будемо розглядати і аналізувати більш докладно далі.

3.2 Методи вимірювання загасання, що засновані на застосуванні оптичних тестерів

3.2.1 Функціональні і конструктивні особливості оптичного тестера

У загальному випадку OLTS являє собою, як вище було зазначено, комплект вимірювального обладнання, до складу якого входять джерело оптичного випромінювання та вимірювач оптичної потужності. Залежно від виробника та конкретної моделі ці компоненти можуть бути реалізовані як окремі пристрої або об’єднані конструктивно в одному корпусі. Незважаючи на можливі конструктивні відмінності різних моделей OLTS, принцип визначення втрат в них залишається однаковим. Порівняно з OTDR, тестери мають простішу конструкцію та функціональну архітектуру. Базові принципи виконання вимірювань за їх допомогою є менш складними, а інтерпретація отриманих результатів не потребує глибоких знань щодо аналізу OTDR-рефлектограм або спеціальної підготовки

оператора. Завдяки цьому OLTS широко використовуються для оперативного контролю параметрів ВОЛЗ під час їх монтажу, введення в експлуатацію та технічного обслуговування.

Розглянемо узагальнено принцип функціонування OLTS та призначення його основних блоків на прикладі спрощеної функціональної схеми, яка наведена на рис. 3.1 [17].

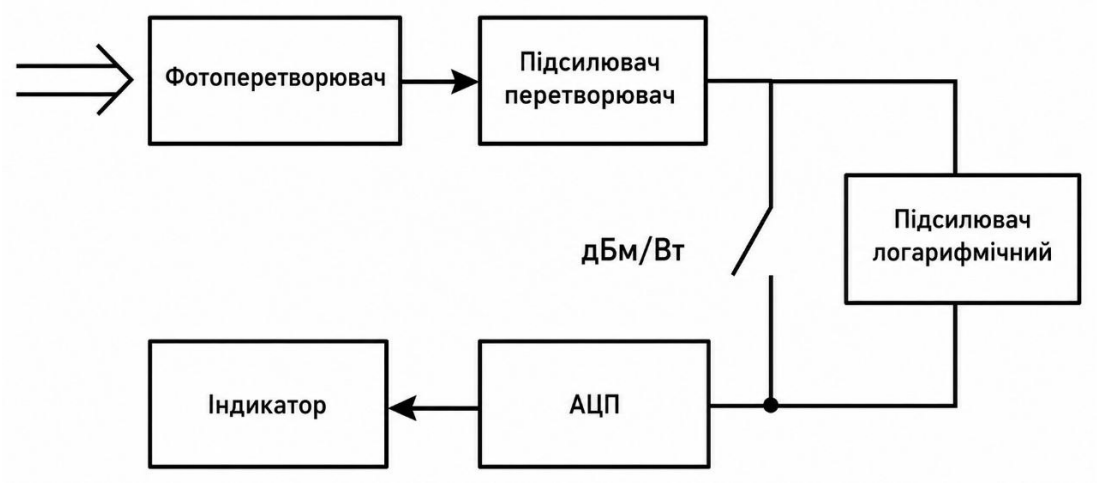


Рисунок 3.1 – Спрощена функціональна схема OLTS

У наведеній схемі OLTS оптичне випромінювання, що надходить із ВС, в якому проводиться вимірювання загасання, надходить на фотоперетворювач, який здійснює перетворення оптичного сигналу в електричний сигнал. Як правило, для цього використовуються фотодіоди, чутливі до робочих довжин хвиль, на яких працюють оптичні систем зв’язку. Далі сигнал подається на підсилювач-перетворювач, який виконує підсилення слабкого електричного сигналу фотодетектора та перетворення фотоструму в напругу для більш зручної подальшої обробки. Цей каскад забезпечує необхідну чутливість вимірювального приладу та покращує співвідношення сигнал/шум. Після підсилення сигнал надходить до вимірювальної частини пристрою. Робота пристрою можлива як у режимі відображення у звичайних лінійних одиницях потужності (Вт, мВт), так і в логарифмічних одиницях (дБм, дБ), для чого логарифмічний підсилювач здійснює логарифмічне перетворення сигналу. В оптичних системах рівні потужності та втрати традиційно виражаються саме в логарифмічних одиницях. Зокрема одиниця вимірювання потужності в дБм (децибел-міліват) показує, наскільки сигнал потужніший або слабший за еталонний рівень у 1 мВт. Таке

подання є зручним, тому що дозволяє легко оперувати або дуже великими, або дуже малими числами за допомогою використання логарифмічної шкали. З перемикача «дБм/Вт» або логарифмічного підсилювача (в залежності від режиму роботи) сигнал надходить на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який виконує його оцифрування. В результаті його цифровий код буде відповідати оптичній потужності, що вимірюється. Оброблені цифрові дані передаються на пристрій індикації, який забезпечує відображення результатів вимірювання на цифровому дисплеї. Залежно від режиму роботи приладу на дисплеї можуть виводитися значення абсолютної оптичної потужності у ватах або міліватах, а також рівні потужності та втрат у децибелах [17].

В якості прикладу OLTS можна взяти будь яку модель, оскільки, як зазначалося, вони можуть мати різні конструкції і вигляд, але принцип проведення вимірювань реалізується однаково. Зокрема у лабораторному практикумі з дисципліни «Технології транспортних мереж», що викладається на кафедрі «Інформаційно-мережна інженерія» у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ) застосовується багатофункціональний оптичний тестер Grandway FHM2A01, який належить до модельного ряду FHM2 та випускається у Китайській народній республіці компанією Grandway Telecom Technologies з 2010-го року і до цих пір включно. Зовнішній вигляд оптичного тестеру наведений на рис. 3.2 [18, 19].

Цей тестер поєднує в одному корпусі джерело оптичного випромінювання (1310/1550 нм) та вимірювач оптичної потужності 850 - 1625 нм (діапазон від –70 до +10 дБм). Прилад реалізує класичний принцип роботи OLTS і використовується для вимірювання рівня оптичної потужності, визначення загасання в оптичних лініях, перевірки якості монтажу оптичних з'єднань і контроля технічного стану оптичних трактів під час їх інсталяції та експлуатації. Підключення оптичної лінії до пристрою робиться через оптичні роз’єми FC/SC, що йдуть у комплекті з ним. Grandway FHM2A01 разом із оптичним сигналом надсилає спеціальний код, завдяки якому приймальна сторона сама здійснює налаштування на потрібну довжину хвилі. Це дозволяє уникнути ймовірної помилки у процесі тестування. Результати вимірювань можна за необхідності зберегти в пам'ять приладу та відкрити на комп’ютері чи ноутбуці за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) для проведення подальшого аналізу [18, 19].



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд оптичного тестеру Grandway FHM2A01

Під час роботи в режимі джерела випромінювання OLTS формує оптичний сигнал на довжині хвилі 1310 або 1550 нм і подає його в оптичну лінію. На протилежному кінці лінії інший OLTS вимірює рівень прийнятої потужності. Порівняння значень потужності на вході та виході дозволяє визначити загасання лінії. У режимі вимірювача потужності оптичний сигнал надходить на фотоприймач приладу, де перетворюється в електричний сигнал, обробляється внутрішньою схемою, за принципом, що був показаний на рис. 3.1 та відображається на дисплеї у ватах, міліватах або децибелах відносно 1 мВт (дБм). На наведеному рисунку 3.2 прилад показує рівень оптичної потужності «–» 18,55 дБм на довжині хвилі 1550 нм.

Нижче наведене призначення кнопок керування на тастатурі Grandway FHM2A01 [18]:

- кнопка «LD λ» (Laser Diode Wavelength) – кнопка управління вбудованим джерелом випромінювання. Вона дозволяє увімкнути або вимкнути лазерний передавач та вибрати потрібну робочу довжину хвилі джерела (1310 або 1550 нм). Ця кнопка використовується під час вимірювання загасання методом OLTS;

- кнопка «Pd λ» (Photo Detector Wavelength) – призначена для вибору калібрувальної довжини хвилі вимірювача потужності. При послідовному натисканні вибираються режими: 1310 нм, 1550 нм, інші довжини хвиль, якщо вони передбачені виробником. Коректний вибір довжини хвилі забезпечує необхідну точність вимірювань;

- кнопка активації двохвильового режиму роботи джерела випромінювання «TWIN». При натисканні тестер автоматично перемикається між довжинами хвиль 1310 і 1550 нм, що дозволяє прискорити вимірювання параметрів оптичної лінії на двох робочих довжинах хвиль;

- кнопка «CW/Hz» вибору режиму генерації оптичного сигналу, яка дозволяє встановити режим безперервного випромінювання (CW – Continuous Wave) або модульовані сигнали: 270 Гц, 1 кГц, 2 кГц. Модульовані режими використовуються у разі пошуку волокон та ідентифікації оптичних ліній за допомогою спеціальних детекторів;

- кнопка «dBm/dB/mW» дозволяє зробити вибір одиниць вимірювання для відображення результатів у: dBm (дБм), mW (мВт), dB (дБ);

- кнопка «REF» (Reference) – призначена для встановлення опорного (еталонного) рівня потужності. Після збереження опорного значення всі подальші вимірювання можуть відображатися як відносні втрати в дБ. Цей режим широко використовується під час вимірювання загасання у оптичних лініях;

- кнопка «LOAD» – це кнопка завантаження збережених результатів вимірювань із внутрішньої пам'яті тестеру. Вона дозволяє переглядати раніше виконані вимірювання без повторного підключення до оптичної лінії;

- кнопка підсвічування дисплея (позначена символом лампи);

- кнопка «ON/OFF» – включення/виключення живлення тестеру та активації режиму автоматичного вимкнення для економії заряду батареї.

Крім того, у верхній частині клавіатури тестеру можна бачити світлодіодні індикатори [18]:

- 1310, 1550 – показують індикацію вибраної довжини хвилі;

- 270, 1K, 2K – показують індикацію режиму модуляції оптичного сигналу при відповідному натисканні кнопки «CW/Hz».

Відповідно до рекомендацій ITU-T G.651, ITU-T G.652 та вимог ДСТУ 26814-86, під час вимірювання параметрів волоконно-оптичних ліній зв'язку за допомогою OLTS застосовують дві основні методики визначення втрат: метод

обриву волокна та метод внесених втрат. Обидва методи базуються на вимірюванні оптичної потужності, проте відрізняються порядком виконання вимірювань і способом визначення загасання в досліджуваному волокні [16]. Розглянемо базові принципи і особливості кожної із цих методик більш детально.

3.2.2 Базові принципи і особливості вимірювання загасання у ВС методом обриву волокна

Функціональна схема проведення вимірювань загасання у волоконних світловодах за методом обриву показана на рис. 3.3 [16].

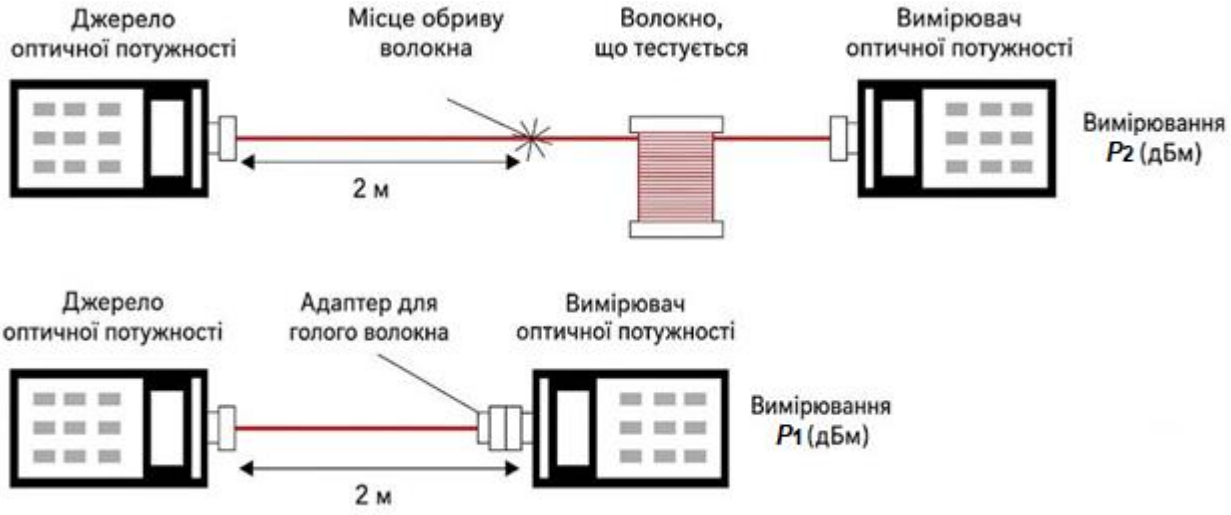


Рисунок 3.3 – Функціональна схема вимірювання загасання у ВС за методом обриву

Метод обриву волокна ґрунтується на порівнянні значень оптичної потужності, що була виміряна на виході довгого і короткого відрізків волокна, що тестується. Короткий відрізок утворюється шляхом обриву від початку волокна, що тестується (близько 2 м). Такий підхід забезпечує високу точність визначення загасання, оскільки дозволяє мінімізувати вплив додаткових втрат у з'єднаннях і вимірювальному обладнанні, що є перевагою цього методу. Водночас в реальних умовах або під час проведення технічного обслуговування вже прокладеного ВОК застосування цього методу є обмеженим через необхідність фізичного пошкодження волокна, що є його великим недоліком. Тому метод обриву

переважно використовується в лабораторних умовах, в процесі виробництва та проведення випробувань ВС і ВОК [16, 20].

Під час проведення вимірювання до виходу джерела оптичного випромінювання (ДОВ) підключається оптичний шнур (типу pig-tail), який зварюється з волокном, що тестується. На протилежному кінці волокна, що тестується, із застосуванням адаптера для голого волокна виконується його підключення до вимірювача оптичної потужності. Після ввімкнення ДОВ вимірюється значення оптичної потужності (P_2, дБм), що пройшла через усе волокно, що тестується.

Далі робиться обрив волокна, що тестується, на відстані приблизно 1,5 - 2 м від ДОВ, після чого цей короткий відрізок через адаптер підключають до вимірювача оптичної потужності. За таких умов реєструється значення оптичної потужності (P_1, дБм) практично без впливу втрат у лінії.

Звідси можна бачити, що величина загасання характеризує зменшення оптичної потужності під час розповсюдження оптичного сигналу по ВС і знаходиться як різниця між виміряними значеннями потужностей (P_1) та (P_2), тобто [16, 20]:

$$A = P_1 - P_2 \text{ [дБ]}. \qquad (3.1)$$

Звідси можна визначити нормований коефіцієнт загасання на 1 км [20]:

$$\alpha = A / l \text{ [дБ/км]}, \qquad (3.2)$$

де l – довжина волоконного світловода, км

Досить важливим моментом, який впливає на точність проведення вимірювання загасання за методом обриву волокна, є правильний вибір ДОВ. Вихідна оптична потужність P_1 та довжина хвилі випромінювання λ мають бутим високостабільними протягом усього процесу вимірювання. Крім того, рівень оптичної потужності P_1 має бути достатнім а випромінювання мати вузьку спектральну ширину. Виконання цих вимог дозволяє розширити діапазон значень загасання, що вимірюються та забезпечити узгодженість результатів, які отримуються різним вимірювальним обладнанням.

Для досягнення максимальної точності необхідно також виключити будь-які зміщення оптичного конектора у роз'ємі ДОВ. Навіть незначна зміна його

положення може призвести до можливої зміни значення загасання у місці з'єднання і, відповідно, з’явиться похибка вимірювань. Зазначу, що перепідключення світловода в адаптері голого волокна на вимірювачі потужності, практично не здійснює впливу на результат, тому що в такому адаптері немає внутрішнього оптичного конектора. У разі дотримання зазначених вимог і умов метод обриву забезпечує отримання еталонних значень загасання ВС [16, 20].

Окремо треба звернути увагу, що під час вимірювання загасання в MMF необхідно враховувати особливості поширення світла за різними модами. Кожна мода проходить свій власний шлях уздовж серцевини світловода, тому значення загасання на окремих модах може відрізнятися. У результаті загасання, що вимірюється, фактично буде мати усереднене значення для сукупності всіх направлених мод, що розповсюджуються у ВС. При цьому остаточний результат вимірювання залежить від розподілу оптичної енергії між модами та інтенсивності їх взаємодії. Рівноважний розподіл енергії між модами встановлюється лише після проходження світлом певної відстані, яка називається довжиною встановлення ($L_{\text{в}}$) зв’язку, значення якої зазвичай є більшим за 5 км. Тому при проведенні вимірюванні загасання на коротких ділянках MMF результати можуть суттєво залежати від його довжини та умов введення випромінювання. Для усунення цього впливу перед проведенням вимірювань штучно формують рівноважний розподіл енергії між модами. Для цього використовують додаткові ВС, що мають довжину, яка є більшою за $L_{\text{в}}$ (тобто $L > L_{\text{в}}$). Також можуть бути використані спеціальні змішувачі мод. Ці пристрої забезпечують перерозподіл енергії між модами та підвищують відтворюваність результатів вимірювання. Вони виконуються у вигляді стрижня, що має діаметр від 15 до 40 мм і довжину близько 20 мм з кількома витками ВС, які намотані з невеликим натяжінням [20]

3.2.3 Базові принципи і особливості вимірювання загасання у ВС методом внесених втрат

Метод внесених втрат є менш точним, якщо порівнювати з розглянутим вище методом обриву волокна, але тут немає необхідності здійснювати розрив ВС. Цей фактор є визначальним щодо застосування цього методу в умовах

реальної експлуатації, технічного обслуговування та діагностики ВОЛЗ. Для реалізації проведення вимірювань за цим методом використовується оптичний тестер, в якому ДОВ та вимірювач оптичної потужності оснащені оптичними роз'ємними з'єднувачами. Аналогічними роз'ємами також оснащені волокно, в якому необхідно провести вимірювання загасання та з'єднувальні оптичні шнури (ЗОШ) типу патч-корд (patching cord), які виконують функцію своєрідних еталонних оптичних ліній [20].

Сутність методу полягає у визначенні втрат, що вносяться певною ділянкою ВОЛЗ. Для цього спочатку встановлюють опорне значення потужності, використовуючи еталонну лінію на основі ЗОШ, а після підключення волокна, що тестується, визначають зміну рівня прийнятої оптичної потужності. Різниця між опорним та виміряним значеннями відповідає величині внесених втрат. Залежно від способу підключення еталонних ЗОШ розрізняють два основних підходи реалізації цього методу. Одним із найбільш поширених є підхід проведення вимірювання із застосуванням двох еталонних ЗОШ, як це наведено на рис. 3.4 [16].

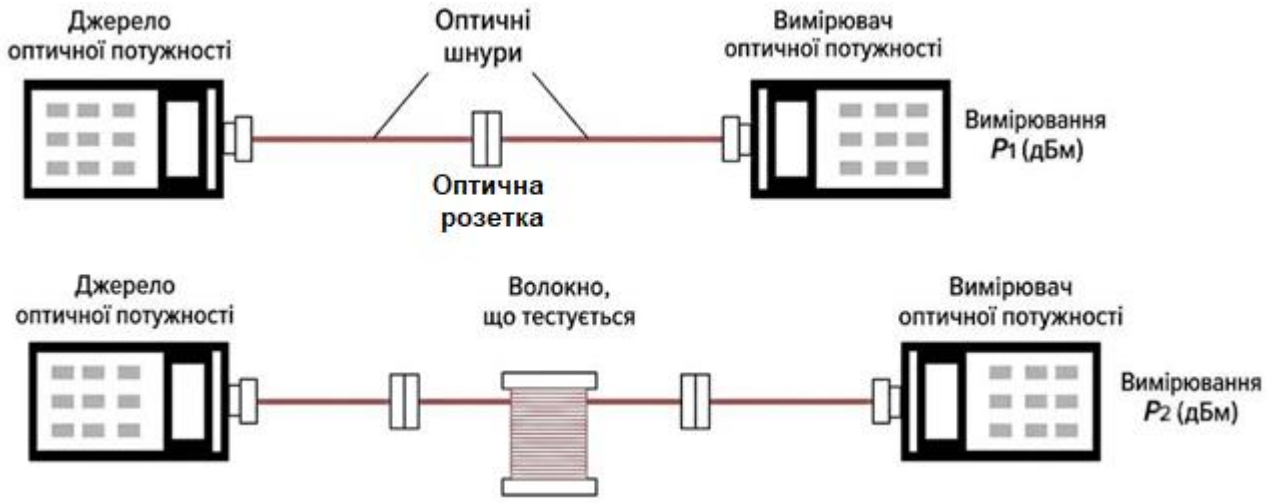


Рисунок 3.4 – Функціональна схема вимірювання загасання у ВС за методом внесених втрат із двома еталонними ЗОШ

Тут для проведення вимірювань за методом внесених втрат у ДОВ та вимірювач оптичної потужності підключаються ЗОШ типу патч-корд. Вимірювання виконують у два етапи. На першому етапі ЗОШ з'єднують між собою за допомогою проміжної оптичної розетки (адаптера) і вимірюють рівень оптичної потужності без підключення волокна, що тестується. Отримане значення

приймається за опорний рівень потужності (P_1). На другому етапі еталонні ЗОШ від'єднують від проміжної розетки та підключають до роз'ємів на кінцях волокна, яке треба протестувати. Після проходження випромінювання через нього вимірюється рівень оптичної потужності. Зазначимо, що загасання і коефіцієнт загасання волокна при використанні тільки еталонних ЗОШ визначають за формулами (3.1) і (3.2). Але у разі вимірювання загасання у волокні, що тестується, в його значення окрім втрат у безпосередньо самому волокні, також будуть входити і втрати в ЗОШ ($\alpha_п$) [16, 20]:

$$A = 10lg\frac{P_1}{P_2} + \alpha_п, [дБ]. \quad (3.3)$$

Особливістю даного способу вимірювання є те, що точні значення втрат у роз'ємних з'єднувачах ЗОШ залишаються невідомими. Після роз'єднання та повторного з'єднання конекторів з іншими оптичними роз'ємами величина внесених втрат може змінюватися через незначні відхилення у взаємному позиціонуванні торців світловодів, стан поверхонь самих конекторів або точність здійснення центрування. Унаслідок цього результати повторних вимірювань можуть дещо відрізнятися, що є одним із основних джерел похибки цього методу [16].

Інший підхід цього методу ґрунтується на проведенні вимірювань з одним еталонним ЗОШ, як це зображено на рис. 3.5 [16].

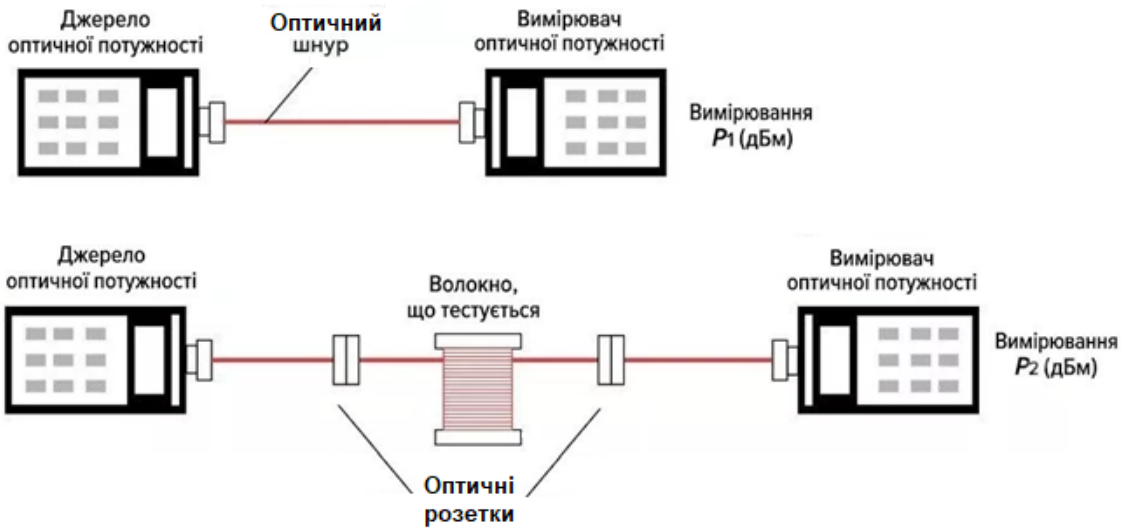


Рисунок 3.5 – Функціональна схема вимірювання загасання у ВС за методом внесених втрат з одним еталонним ЗОШ

Цей підхід вимірювання рекомендований у стандарті TIA-568-C.3 в якості основного способу визначення внесених втрат у ВОЛЗ. Його особливість полягає в тому, що опорний рівень оптичної потужності (P_1) визначається із використанням лише одного еталонного ЗОШ, який після калібрування залишається підключеним до ДОВ протягом здійснення усього процесу вимірювання. Після того, як вже встановлене значення P_1, до вимірювача оптичної потужності підключають другий еталонний ЗОШ, а між ЗОШ джерела та вимірювача включають волокно, у якому потрібно зробити вимірювання. Далі реєструють значення оптичної потужності, що пройшла через волокно, яке тестується (P_2). Слід зазначити, що розглянуті на рис. 3.4 и 3.5 підходи щодо здійснення вимірювання методом внесених втрат, відрізняються складом втрат, які враховуються в кінцевому результаті. У підході з двома еталонними ЗОШ враховуються переважно втрати в конекторах волокна, що тестується. Натомість у підході, що рекомендований у стандарті TIA-568-C.3, до результату додатково додаються втрати, які виникають у результаті підключення роз'ємних з'єднувачів еталонних ЗОШ [16, 20].

Слід зазначити, що у практичних умовах експлуатації при проведенні вимірювань у вже прокладеному ВОК, коли кінці волокна, що тестується розташовані на значній відстані один від одного, для визначення внесених втрат часто виникає необхідність використання двох вимірювачів оптичної потужності. Перед початком вимірювань їх покази попередньо узгоджують шляхом підключення до одного і того самого ДОВ. Також на точність вимірювань істотно впливають не лише нестабільність параметрів ДОВ та втрати в роз'ємних з'єднувачах, але і додаткові втрати, що спричинені вигинами світловодів. Незважаючи на це, метод внесених втрат забезпечує високу точність визначення сумарних втрат в оптичній лінії та, як правило, є більш точним у порівнянні з непрямими методами оцінювання загасання, що базуються на аналізі зворотного розсіювання із використанням OTDR [16].

3.3 Принципи вимірювання загасання, що засновані на використанні оптичних рефлектометрів

Методи проведення вимірювань на основі застосування OLTS, що були розглянуті вище, дозволяють з більшою або меншою точністю визначати сумарні

оптичні втрати у оптичній лінії зв'язку. Однак вони не дають можливості знайти конкретне місце пошкодження або визначити ділянку ВС, де виникають підвищені втрати, або можлива аварійна ситуація чи погіршення параметрів передачі в лінії. Найефективнішим на сьогодні підходом для вирішення цієї проблематики з можливістю не тільки здійснення оцінювання розподілу втрат уздовж оптичного тракту, але й визначення координат знаходження у ньому неоднорідностей застосовують оптичні рефлектометри (OTDR). Причому OTDR дозволяє проводити вимірювання та локалізацію дефектів, маючи доступ лише до одного кінця ВС. Таким чином, до основних задач OTDR можна віднести [16]:

- контроль якості ВС на барабані перед його інсталяцією (так званий «вхідний контроль);
- оцінка якості при здійсненні зварних з’єднань ВС,
- досить приблизне визначення повних втрат в оптичній лінії шляхом вимірювання;
- здійснення пошуку, визначення та локалізація проблемних ділянок (неоднорідності, пошкодження, тощо) у ВС, що тестується.

Розглянемо більш докладно функціональні і конструктивні особливості OTDR та принцип його застосування для проведення вимірювань.

3.3.1 Функціональні і конструктивні особливості OTDR

У більшості сучасних оптичних рефлектометрів використовується модульний принцип побудови. У типовому спрощеному вигляді функціональну схему OTDR з урахуванням особливостей модульної конструкції можна подати, як це показано на рис. 3.6. Така конструкція зазвичай складається з базового модуля (БМ) та одного або декількох змінних оптичних модулів (ОМ). БМ являє собою переносний спеціалізований обчислювальний пристрій (за своїм виглядом схожий на ноутбук чи планшет), що призначений здійснювати управління процесом вимірювання, обробки отриманих результатів, виконання необхідних розрахунків та відображення остаточних результатів на дисплеї приладу у вигляді, як правило, рефлектограми. До складу ОМ входять наступні основні елементи: лазерний діод, імпульсний генератор, фотоприймач, оптичний відгалужувач, та оптичний роз'єм. Лазерний діод формує короткі оптичні імпульси, які вводяться у ВС, в якому проводяться вимірювання. Фотоприймач

реєструє зворотно-розсіяне та відбите випромінювання, що повертається з ВС. Оптичний відгалужувач забезпечує розділення оптичних сигналів – переданого та прийнятого, а оптичний роз'єм призначений для підключення оптичної лінії через ЗОШ до приладу [21, 22].

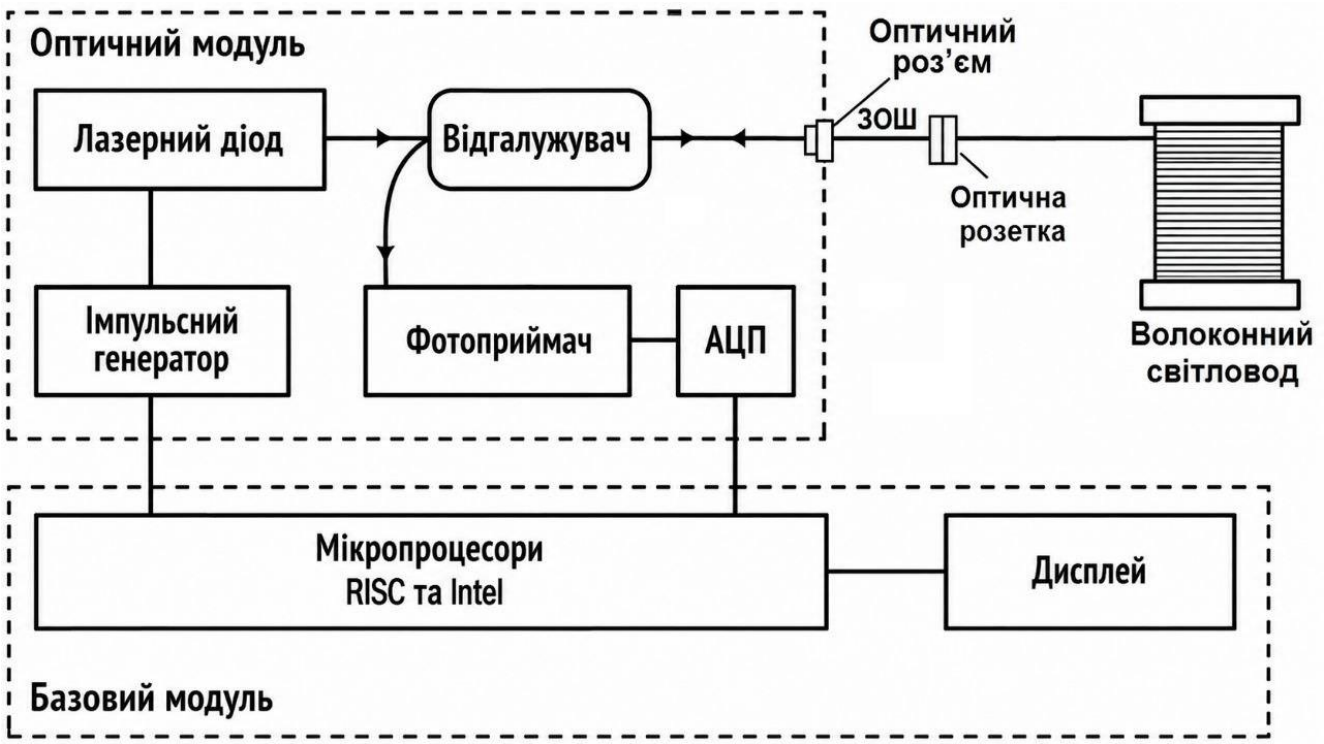


Рисунок 3.6 – Типове спрощене подання функціональної структури OTDR

Модульна конструкція OTDR надає користувачу можливість формувати конфігурацію приладу відповідно до конкретних умов вимірювання. Крім того, у процесі експлуатації можливе розширення функціональних можливостей рефлектометра шляхом встановлення додаткових оптичних модулів, наприклад, для роботи з MMF або SMF із розширеним динамічним діапазоном [21, 22].

Розглянемо більш докладно призначення елементів і принцип функціонування рефлектометру, типова спрощена схема якого наведена на рис. 3.6 Лазерні діоди (наприклад, ЛД типу Фабрі-Перо) у складі ОМ рефлектометра використовуються в якості ДОВ. За допомогою ЛД формуються короткі оптичні імпульси (так звані зондуючі імпульси) з рівнями потужністю від 10 до 1000 мВт, тривалістю від 2 нс до 20 мкс та частотою повторення у кілька кГц. Сформовані імпульси через оптичний відгалужувач надходять до оптичного роз'єму, до якого підключається ЗОШ типу патч-корд. На іншому кінці ЗОШ з'єднується з ВС

оптичної лінії, яку треба протестувати, за допомогою проміжної оптичної розетки (адаптера). При розповсюдженні оптичних імпульсів уздовж ВС частина оптичної енергії внаслідок зворотного Релеївського розсіювання (ЗРР) повертається в ОМ до OTDR і через оптичний відгалужувач спрямовується на фотоприймач, функцію якого зазвичай виконує лавинний фотодіод. У фотоприймачі оптичний сигнал перетворюється на електричний, після чого він підсилюється, накопичується та передається до БМ для подальшої цифрової обробки. Зокрема у БМ здійснюється аналіз отриманих даних, а результати вимірювань графічно відображаються на дисплеї у вигляді так званої рефлектограми. Такий підхід до подання інформації дозволяє не лише візуально оцінювати стан ВС оптичної лінії, що тестується, але й виконувати автоматичний аналіз його параметрів за допомогою вбудованих програмних алгоритмів [21, 22].

Слід зазначити, що потужність сигналу, що повертається внаслідок ЗРР, є значно меншою за потужність зондуючих імпульсів, що формуються ЛД і уводяться у ВС. Зокрема потужність розсіяного сигналу залежно від тривалості його імпульсів) може бути меншою на 50 - 80 дБ. У зв'язку з цим для підвищення точності тестування ВС та покращення співвідношення сигнал/шум у OTDR використовується метод багаторазового усереднення результатів, що були виміряні. Оскільки час проходження оптичного сигналу по лінії є дуже малим (наприклад, ділянку довжиною 100 км світло проходить приблизно за 1 мс), ефективне усереднення може бути виконане протягом декількох секунд [21, 22].

Типова OTDR-рефлектограма містить близько 32 000 вимірювальних точок, причому для визначення значення кожної точки робиться усереднення результатів, що отримуються від кількох тисяч імпульсів. Незважаючи на значний обсяг даних, що потрібно обробити, сучасні OTDR виконують усі необхідні обчислення за частку секунди (залежно від характеристик продуктивності БМ). Тобто первісна рефлектограма виводиться на дисплей практично відразу після початку вимірювань, а в подальшому вона поступово замінюється усередненими рефлектограмами з меншим рівнем шуму. Зокрема кожне подвоєння часу вимірювання забезпечує зменшення рівня шумів на рефлектограмі приблизно на 0,75 дБ [21, 22].

Обробка значного обсягу вимірювальних даних та реалізація зручного для користувача інтерфейсу в сучасних OTDR здійснюється за допомогою двох процесорної системи, кожен з яких виконує спеціалізовані функції. Перший, високопродуктивний мікропроцесор, що побудований на RISC-архітектурі, призначений для виконання операцій, що пов'язані із первинною обробкою даних,

отриманих у процесі проведення вимірювань. Його висока швидкодія дозволяє виконувати усереднення до десятків мільйонів вимірювальних точок за секунду, що забезпечує оперативне формування рефлектограми та зменшення на ній рівня шумів. Другий мікропроцесор, що побудований на базі архітектури Intel, забезпечує функціонування програмного інтерфейсу взаємодії з користувачем, автоматичний пошук дефектів та неоднорідностей у волоконно-оптичній лінії, а також відображення результатів вимірювань на дисплеї. Крім того, цей мікропроцесор забезпечує сумісність OTDR із комп'ютерним обладнанням (персональний комп’ютер, ноутбук, планшет), завдяки чому рефлектометр підтримує використання стандартних засобів введення / виведення інформації, що суттєво розширює функціональні можливості приладу та спрощує обробку результатів вимірювань [21, 22].

Таким чином, можна стверджувати, що сучасний OTDR поєднує функції вимірювального приладу та спеціалізованої комп'ютерної системи. Такий підхід дозволяє не лише виконувати вимірювання параметрів волоконно-оптичної лінії, але й здійснювати детальний аналіз отриманих результатів. Зокрема, користувач може масштабувати окремі ділянки рефлектограми, автоматично формувати перелік виявлених неоднорідностей, визначати погонне загасання на окремих ділянках ВС, а також створювати та зберігати звіти за результатами проведених вимірювань.

3.3.2 Загальні принципи і підходи щодо проведення вимірювань втрат із застосуванням OTDR

Як було вище показано, принцип роботи OTDR ґрунтується на введенні у ВС коротких зондуючих імпульсів та подальшому аналізі частини оптичного потоку, що повертається у зворотному напрямку до фотоприймача внаслідок ефектів ЗРР та відбиття від неоднорідностей світловода. З точки зору теорії сигналів процес вимірювання відбитого випромінювання можна розглядати як перетворення вхідного сигналу *e(t)*, що характеризує потужність зондуючого імпульсу від лазерного ДОВ, у вихідний сигнал *s(t)*, який відповідає потужності відбитого або зворотно-розсіяного випромінювання. Таке перетворення реалізується вимірювальною системою OTDR, властивості якої описуються її імпульсною передатною функцією *h(t)*. Це можна показати наступним виразом [22]:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{t} e(\theta)h(t-\theta)d\theta.$$

У разі, коли вхідний сигнал має вигляд δ-імпульсу, тобто $e(t) = \delta(t)$, вихідний сигнал вимірювальної системи буде безпосередньо визначатися її імпульсною характеристикою, тобто $s(t) = h(t)$. Отже, у такому випадку форма вихідного сигналу фактично відображає розподіл потужності зворотно-розсіяного випромінювання у ВС. За цієї причини у разі реалізації рефлектометричного методу вимірювань зондуючі оптичні імпульси повинні максимально наближатися до δ-імпульсів. Для цього необхідно забезпечити мінімальну тривалість імпульсу та максимально круті передній і задній фронти. Використання коротких імпульсів дозволяє підвищити просторову роздільну здатність OTDR, тобто забезпечити можливість розрізнення неоднорідностей, які є близько розташованими, і більш точно визначати координати дефектів та місць з'єднання у ВС.

Вище було зазначено, що після реєстрації фотоприймачем отриманого сигналу він піддається математичній обробці, в результаті чого на дисплеї рефлектометра формується графічна залежність, яка називається рефлектограмою (рис. 3.7), і являє собою залежність рівня загасання зворотно-розсіяного та відбитого оптичного сигналу від довжини волоконного світловода. Таким чином, вона відображає результат взаємодії зондувального імпульсу з неоднорідностями волоконно-оптичної лінії та містить інформацію про розподіл втрат, відбиттів і місця розташування дефектів уздовж оптичного волокна. Зокрема, наприкла, визначення відстані до неоднорідності здійснюється за часом проходження світлового імпульсу від рефлектометра до місця неоднорідності та назад [22].

На рефлектограмі, що наведена на рис. 3.7, можна бачити декілька характерних ділянок, які відповідають різним неоднорідностям ВС. Такі неоднорідності в практиці здійснення рефлектометричних вимірювань прийнято називати подіями (events). Для коректного визначення втрат на окремих ділянках ВОЛЗ треба вміти правильно ідентифікувати та інтерпретувати всі події, що відображаються на рефлектограмі. Зокрема до основних типів подій належать [16]:

- початковий сплеск рівня зворотного сигналу, який виникає на вході в лінію внаслідок відбиття оптичного випромінювання від вхідного конектора або іншого елемента при введенні сигналу у світловод;

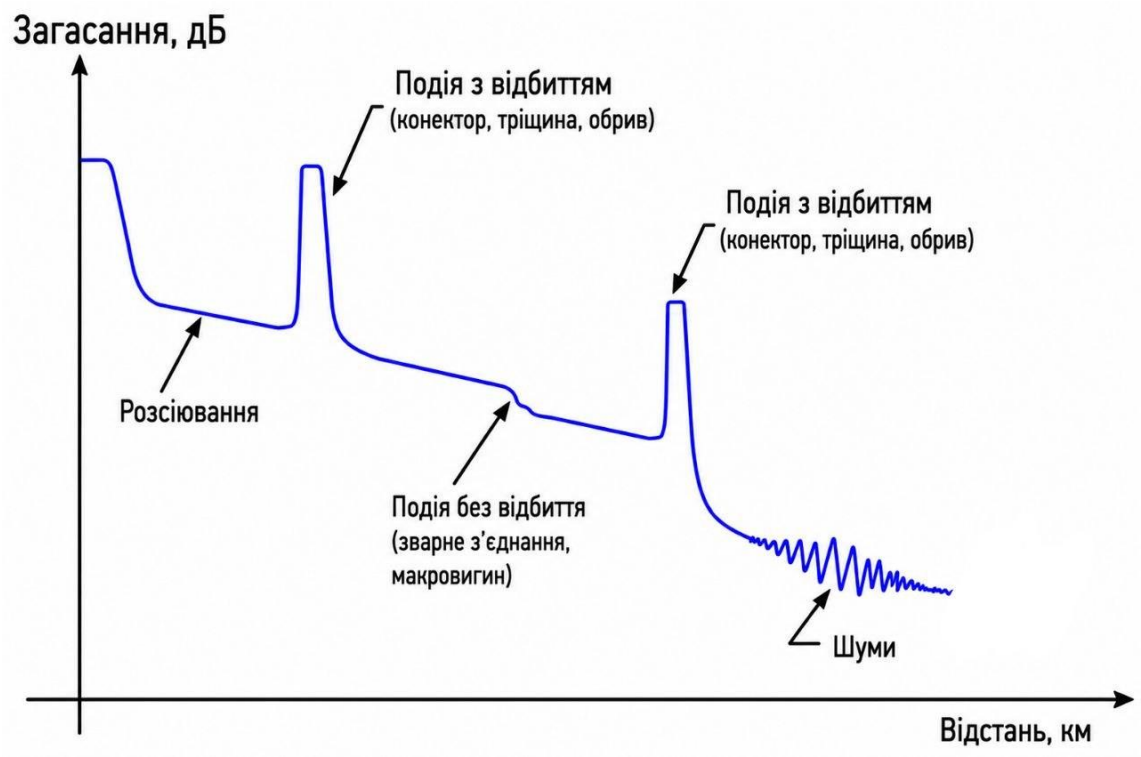


Рисунок 3.7 – Загальний вигляд типової рефлектограми

- похилі лінійні ділянки рефлектограми, які розташовані між окремими неоднорідностями. Такі ділянки відповідають бездефектним відрізкам світловода, де зменшення рівня зворотно-розсіяного сигналу зумовлене рівномірним загасанням, що виникає внаслідок поглинання та розсіювання світла. Кут нахилу цих ділянок прямо пов'язаний із величиною погонного (на 1 км) загасання ВС;

- події без відбиття – це елементи рефлектограми, які є характерними, наприклад, для зварних з'єднань, макро- чи мікровигинів ВС. На рефлектограмі вони зазвичай відображаються у вигляді ступінчастої зміни рівня зворотно-розсіяного сигналу без появи вираженого піка відбиття;

- події з відбиттям – це елементи рефлектограми, що відображають події у місцях роз'ємних з'єднань, показують наявності мікротріщин, сколів або відкритих торців ВС. Такі події відображаються на дисплеї у вигляді різких піків, амплітуда яких залежить від коефіцієнта відбиття на неоднорідності;

- кінець оптичної лінії – ця подія характеризується зміною рівня зворотного сигналу з подальшим його спадом до рівня шумів. Форма події, що відповідає кінцю лінії, може бути різною і залежить від стану торця світловода. Зокрема, вона визначається типом встановленого конектора, наявністю або відсутністю конектора, якістю проведеного сколу торця ВС, тощо. У деяких випадках торець

світловода може створювати значне відбиття, а в інших – практично повністю розсіювати випромінювання.

Аналіз рефлектограми за наведеними вище подіями дозволяє визначати основні параметри ВС, зокрема: зробити оцінку величини його загасання; у разі необхідності локалізувати місця обриву; визначати внесені втрати в оптичних з'єднаннях та пасивних компонентах; виявити ділянки механічного впливу на світловод, а також здійснювати контроль низки інших характеристик, що визначають технічний стан та якість функціонування ВОЛЗ в цілому.

Треба окремо звернути увагу, що при проведенні рефлектометричних вимірювань обов’язково треба звертати увагу на характеристики того або іншого рефлектометра, що застосовується.

Важливою характеристикою рефлектометра є так звана «мертва зона», під якою розуміють ділянку на отриманій рефлектограмі після неоднорідності, на якій здійснення процесу вимірювання або виявлення наступних подій є ускладненим або неможливим. Перша подія, що є практично на будь-якій рефлектограмі, відповідає відбиттю від вхідного оптичного роз'єму рефлектометра. Оскільки цей роз'єм розташований безпосередньо поблизу фотоприймача, потужний відбитий сигнал призведе до його тимчасового перевантаження або «засліплення». У цей проміжок часу фотоприймач не може здійснювати коректну реєстрацію слабких сигналів ЗРР, внаслідок чого на рефлектограмі OTDR формується мертва зона [23].

Розрізняють два види мертвих зон [23]:

- мертва зона відбиття – це область поблизу відбиваючої неоднорідності, в межах якої неможливо виявити іншу подію з відбиттям;

- мертва зона загасання – це область поблизу події з відбиттям, в межах якої неможливо достовірно зробити вимірювання рівня ЗРР сигналу та визначити загасання у світловоді. Тому ця ділянка буде виключена із процесу оцінювання втрат.

Для сучасних OTDR типовими є значення мертвої зони відбиття в межах 1 - 3 м, а мертвої зони загасання в межах 7 - 10 м.

На практиці це означає, що для коректного визначення втрат дві сусідні неоднорідності повинні бути рознесені одна від одної на відстань не менше 7 - 10 м. Водночас факт наявності 2-х окремих подій з відбиттям (наприклад, 2-х

оптичних роз'ємів, що послідовно розташовані) може бути виявлений уже за умови, що відстань між ними становить не менше 1 - 3 м [23].

Також ключовою і, можливо, найважливішою характеристикою будь-якого оптичного рефлектометра є його динамічний діапазон. Цей параметр визначає різницю між рівнем потужності зондуючого імпульсу та мінімальним рівнем зворотного сигналу, який ще може бути достовірно зареєстрований фотоприймачем рефлектометру. Як правило, мінімальний рівень сигналу визначається за умови, що відношення сигнал/шум дорівнює одиниці. Для більшості сучасних OTDR типовими є значення динамічного діапазону в межах 34 - 36 дБ. Для проведення вимірювань в коротких оптичних лініях можуть застосовуватися прилади, що мають динамічним діапазоном у межах 28 - 32 дБ. У випадку проведення вимірювань в протяжних лініях або в мережах, де використовується пасивні компоненти, що мають великі втрати, наприклад, пасивні оптичні мережі (PON) чи розгалужені мережі кабельного телебачення (CATV), – використовуються рефлектометри з динамічним діапазоном 40 - 45 дБ і більше [23].

Зазначимо, що саме динамічний діапазон OTDR визначає максимальну величину загасання, яка може бути виміряна цим приладом. Чим більшим є динамічний діапазон OTDR, тим більшу довжину волоконно-оптичної лінії або більші сумарні втрати в ній можна досліджувати без зниження достовірності результатів. Якщо сумарні втрати (загасання) лінії перевищує значення динамічного діапазону рефлектометра, то рівень ЗРР сигналу на віддалених ділянках ВС стає практично таким же, як і рівень шумів, що ускладнює точність визначення загасання та локалізацію неоднорідностей. Таким чином, необхідною умовою щодо правильного вибору обладнання OTDR та забезпечення достовірного проведення вимірювання втрат по всій довжині світловода є обґрунтована оцінка динамічного діапазону.

4 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ТА ОЦІНКИ ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ OTDR

Динамічний діапазон (D [дБ]) оптичного рефлектометра OTDR у відповідності із рекомендацією провідної міжнародної некомерційної електротехнічної комісії IEC (International Electrotechnical Commission – Міжнародна електротехнічна комісія) є різницею між значенням сигналу зворотного Релеївскького розсіяного випромінювання на початку рефлектограми та максимальним (піковим) значенням рівня шумів, у разі коли оптичний сигнал відсутній. Визначення рівня ЗРР сигналу здійснюють за принципом екстраполяції нахиленої лінійної ділянки рефлектограми в її початок (див. рис. 4.1) [22, 24].

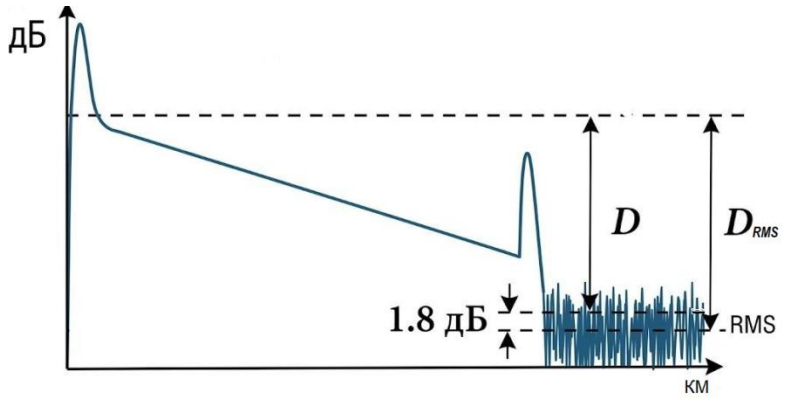


Рисунок 4.1 –Динамічний діапазон OTDR

Такий підхід дозволяє оцінити початковий рівень ЗРР сигналу, який використовується для подальшого визначення динамічного діапазону OTDR. Піковий рівень шумів встановлюють з урахуванням умови, що ймовірність потрапляння шумового сигналу в довірчий діапазон повинна становити порядку 98 %. Для цього вздовж верхньої межі шумової доріжки проводять горизонтальну лінію таким чином, щоб її перетинав лише один шумовий пік зі ста піків, що спостережуються (рис. 4.2). Різниця між визначеними рівнями зворотно-розсіяного сигналу та шуму якраз і характеризує динамічний діапазон OTDR [22, 24].

Тобто фізичний зміст динамічного діапазону оптичного рефлектометра базується на тому, що повні втрати (α [дБ]) в оптичній лінії визначаються різницею між рівнями сигналу ЗРР на початку та в кінці рефлектограми (рис. 4.1).

При цьому кінцева ділянка рефлектограми може бути достовірно зареєстрована лише доти, доки рівень зворотно-розсіяного сигналу перевищує рівень шумів вимірювального тракту [22, 24].

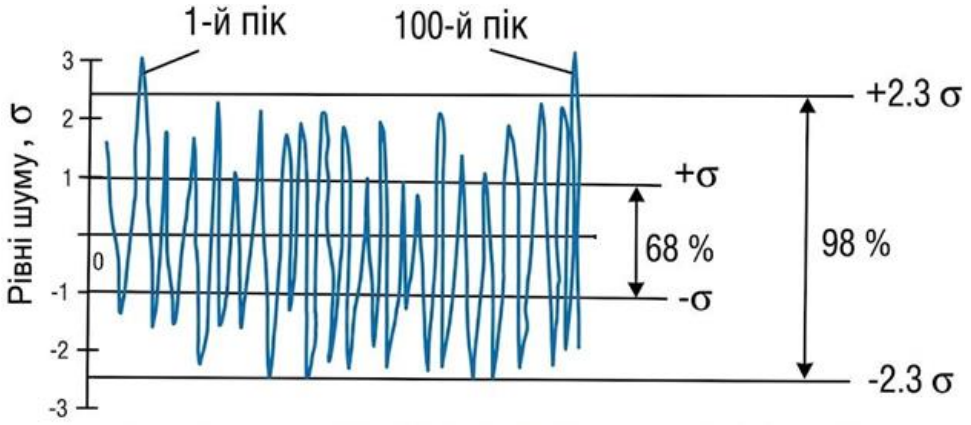


Рисунок 4.2 – Визначення довірчого інтервалу шумового сигналу в OTDR

Слід звернути увагу, що більшість виробників OTDR визначають рівень шуму (σ [дБм]) не за його піковим значенням, а за його середньоквадратичним значенням (Root Mean Square, RMS). Такий підхід дозволяє більш об'єктивно оцінити середній рівень шумової складової вимірювального сигналу. У разі використання RMS шуму динамічний діапазон рефлектометра буде D_{RMS}, і його величина є приблизно на 1,8 дБ більшою у порівнянні з динамічним діапазоном D, що визначається відповідно до рекомендації комісії IEC (тобто у разі використання пікового рівня шуму (рис. 4.1). Це пояснюється тим, що RMS шум є меншим за його пікове значення, а отже, надає більш оптимістичну оцінку динамічних можливостей OTDR [22, 24].

Проаналізуємо причини, за яких RMS рівня шуму виявляється приблизно на 1,8 дБ нижчим за його пікове значення. Припустимо, що шумовий сигнал підпорядковується нормальному (гаусовому) закону розподілу. Відомо, що у разі такого розподілу, імовірність перебування випадкової величини в межах інтервалів $-2\sigma \ldots +2\sigma$ та $-3\sigma \ldots +3\sigma$ становить відповідно порядку 95 % та 99,7 %, де величина $\sigma \equiv$ RMS (тобто відповідає середньоквадратичному значенню шуму). Як зазначалося, ймовірність потрапляння шумового сигналу в довірчий діапазон має становити 98%. Можна бачити, що цьому значенню відповідає проміжний інтервал приблизно $(-2{,}3\sigma \ldots +2{,}3\sigma)$ (рис. 4.2), тобто у лінійному масштабі пікове значення шуму приблизно у 2,3 рази перевищує його середньоквадратичне

значення. При переході до логарифмічного масштабу, який використовується в OTDR (за його шкалою це 5log) – в 2,3 рази менша величина для відображення рівнів шуму зміщується вниз приблизно на 1,8 дБ (тому що 5log(2,3) = 1,8). Таким чином, рівень шуму, що визначений за його RMS, є розташованим приблизно на 1,8 дБ нижче у порівнянні з його піковим значенням. Саме цим пояснюється відмінність між значеннями динамічного діапазону, визначеним за рекомендацією IEC та за підходом, що базується на використанні RMS-рівня шуму [22, 24].

Розглянемо докладніше методику здійснення аналітичної оцінки динамічного діапазону. В логарифмічних одиницях (орієнтуючись на розмірності [дБ] і [дБм]) динамічний діапазон OTDR дорівнює напіврізниці між потужністю, що є розсіяною назад на початку світловода (p_c), і еквівалентною потужністю шуму на вході фотоприймача ($p_ш$) (потужність світла, яка призводить до того, що відгук фотоприймача є рівним RMS шуму), тобто [22]:

$$D_{RMS} = \frac{p_c - p_ш}{2}. \tag{4.1}$$

Потужність p_c визначається через потужність ДОВ, що вводиться у ВС ($p_{ДОВ}$); втрати у відгалужувачі (η) і коефіцієнт ЗРР (q), тобто [22]:

$$p_c = p_{ДОВ} - \eta + q.$$

Потужність $p_ш$ визначається через порогову чутливість фотоприймача ($p_{пр}$) та виграш у відношенні сигнал/шум (Signal to Noise Ratio, SNR) (b) за рахунок усереднювання імпульсів, тобто [22]:

$$p_ш = p_{пр} - b.$$

В результаті, підставляючи значення p_c і $p_ш$ у (4.1) отримуємо вираз для визначення динамічного діапазону разі використання RMS шуму [22]:

$$D_{RMS} = \frac{p_{ДОВ} - \eta + q - p_{пр} + b}{2} \tag{4.2}$$

Після того, як в OTDR буде встановлено відповідний ОМ (рис. 3.6), то параметри $p_{ДОВ}$, $p_{пр}$ і η можна вважати вже заданими. Користувач може лише здійснювати вплив на коефіцієнт ЗРР q (шляхом зміни тривалості імпульсів) і на виграш у SNR (b) (шляхом зміни часу усереднювання імпульсів).

Коефіцієнт ЗРР у різних виробників ВС відрізняється на декілька дБ (як, правило, його значення наводиться в специфікації на ВС). Для оцінки q у відповідності з [22] використовують значення:

$$q = -80\ [\text{дБ}] + 10\log\left(\frac{\tau[\text{нс}]}{1[\text{нс}]}\right), \tag{4.3}$$

де τ – тривалість імпульсів;

- «– 80 дБ» – це значення $p_{пр}$ (порогової чутливості фотоприймача), що отримана за умов типового значення порогової чутливості лавинного фотодіода (ЛФД) у 10^{-14}Вт/Гц$^{\frac{1}{2}}$ і ширині смуги в 1 МГц [22].

Як правило більшість оптичних рефлектометрів дозволяє змінювати тривалість імпульсів у діапазоні від 10 нс до 10 мкс. Це надає можливість збільшити коефіцієнт ЗРР на 30 дБ і, відповідно, динамічний діапазон OTDR до 15 дБ.

Якщо припустити, що шум білий, то виграш у SNR буде пропорційний квадратному кореню з числа усереднених імпульсів, тобто: $b = 10\log\sqrt{N}$, де N – кількість усереднених імпульсів. Виходячи з того, що на обробку йде до 10 відсотків часу, то кількість N можна отримати по формулі [22]:

$$N = \frac{0.9t}{T},$$

де t – час усереднення сигналу;

T – період слідування імпульсів.

В результаті виграш у SNR буде:

$$b = 5\log\frac{0.9t}{T}. \tag{4.4}$$

Тобто для оцінки величини динамічного діапазону треба знати не лише час t, але і період їх слідування T. Цей період можна визначити, використовуючи той

факт, що при вимірі величини динамічного діапазону OTDR, як зазначається у [22], виробники рефлектометрів рекомендують підключати до нього ВС, які мають довжину L = 25 км (рис. 4.3).

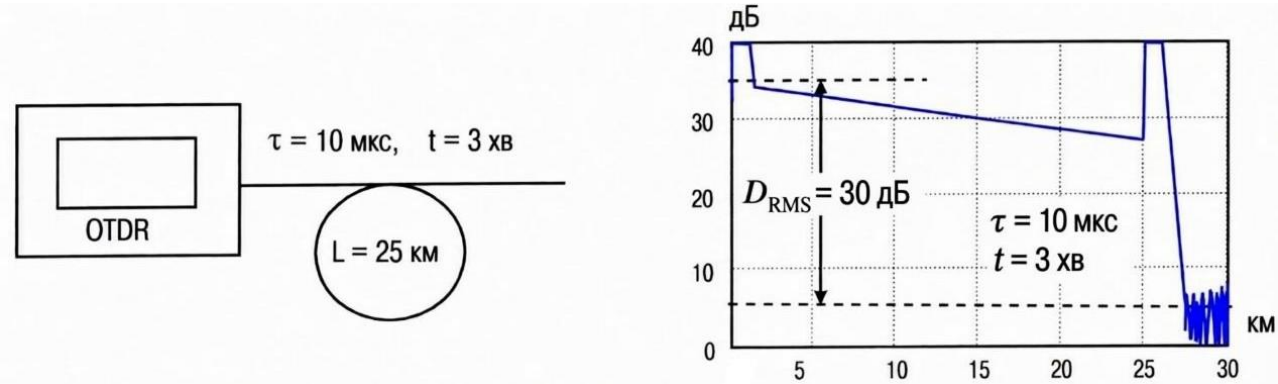


Рисунок 4.3 – Визначення динамічного діапазону у разі стандартних параметрів: L = 25 км, τ = 10 мкс, t = 3 хвилини

Для того, щоб імпульси, що були відбиті від торців ВС на його початку і кінці, не накладалися один на одного, діапазон довжин, що вимірюються, має бути більше довжини ВС приблизно на 10...20 %. Для проведення оцінки будемо вважати, що цей діапазон довжин, що вимірюються, буде складати 30 км. Зважуючи на те, що коефіцієнт пропорційності між часом запізнення і довжиною ВС становить 10 мкс/км, то визначаємо, що T = 300 мкс. При цьому число імпульсів N, що усереднюються за t = 3 хв., буде становити [22]:

$$N = \frac{0.9t}{T} = \frac{0.9 \cdot 180}{3 \cdot 10^{-4}} = 5.4 \cdot 10^5.$$

Звідси параметр виграшу по SNR буде [22]:

$$b = 10\log\sqrt{N} \cong 29 \text{ дБ}.$$

Проведемо оцінку типового значення величини динамічного діапазону OTDR (D_{RMS}), тобто у разі використання середньоквадратичного значення шуму . Орієнтуючись на аналіз вище, будемо вважати значення часових характеристик наступними: τ = 10 мкс, t = 3 хв і T = 300 мкс. Також вище було показано, що при цих часових характеристика, параметр q = –40 дБ, а параметр b = 29 дБ. Втрати у

разі двократного проходження оптичного сигналу через відгалужувач із коефіцієнтом загасання, що вносяться 3 дБ, будуть становити порядку 6 дБ. Це пояснюється тим, що в процесі рефлектометричних вимірювань зондувальний імпульс проходить через оптичний відгалужувач двічі: перший раз – коли вводиться випромінювання у ВС, а другий – у разі проходження зворотно розсіяного або відбитого сигналу до фотоприймача. Оскільки втрати при кожному проходженні складають близько 3 дБ, сумарні втрати складуть, відповідно, близько 6 дБ [22].

Також зробимо допущення, що $p_{\text{ДОВ}}$ = 20 дБм. Як відомо, у разі великої потужності оптичного випромінювання, що розповсюджується у ВС, виникають нелінійні ефекти, зокрема викликані нелінійним розсіянням світла у світловоді (так звані нелінійні ефекти Рамана і Бріллюєна). Крім того, у разі великої потужності оптичного випромінювання, – зменшуються терміни напрацювання на відказ ЛД і фотоприймача (рис. 3.6). Зокрема, фотоприймач містить ЛФД і, так званий, трансімпедансний підсилювач (операційний підсилювач, що має негативний зворотній зв'язок). Наявність такого підсилювача забезпечує великий динамічний діапазон, низькі значення шумів і також він надає можливості варіювати величини коефіцієнта і ширини смуги підсилення. Фотоприймач може функціонувати в 3-х різних режимах [22]:

1) стандартному;

2) вузької смуги частот або забезпечення максимального динамічного діапазону;

3) широкої смуги частот або максимального дозволу

У разі, якщо тривалість імпульсів дорівнює 10 мкс, то фотоприймач функціоную зазвичай у смузі частот приблизно 1 МГц, тобто у 2-му режимі. У цьому випадку, при типовому значенні порогової чутливості ЛФД, що становить $10^{-14}\,\text{Вт}/\text{Гц}^{\frac{1}{2}}$, та ширині смуги частот в 1 МГц, як зазначалося вище і показано в [22], отримуємо, що порогова чутливість фотоприймача $p_{\text{пр}}$ дорівнює – 80 дБм. Роблячи підстановку у формулу (4.2) значень величин, що були отримані або обґрунтовані вище, тобто:

$p_{\text{ДОВ}}$ = 20 дБ, η = 6дБ, q = – 40 дБ, b = 29 дБ та $p_{\text{пр}}$ = – 80 дБм,

обчислюємо, що D_{RMS} = 41,5 дБ. Залежність значення динамічного діапазону (D_{RMS}) від величин τ і t показана на рис. 4.4 [22].

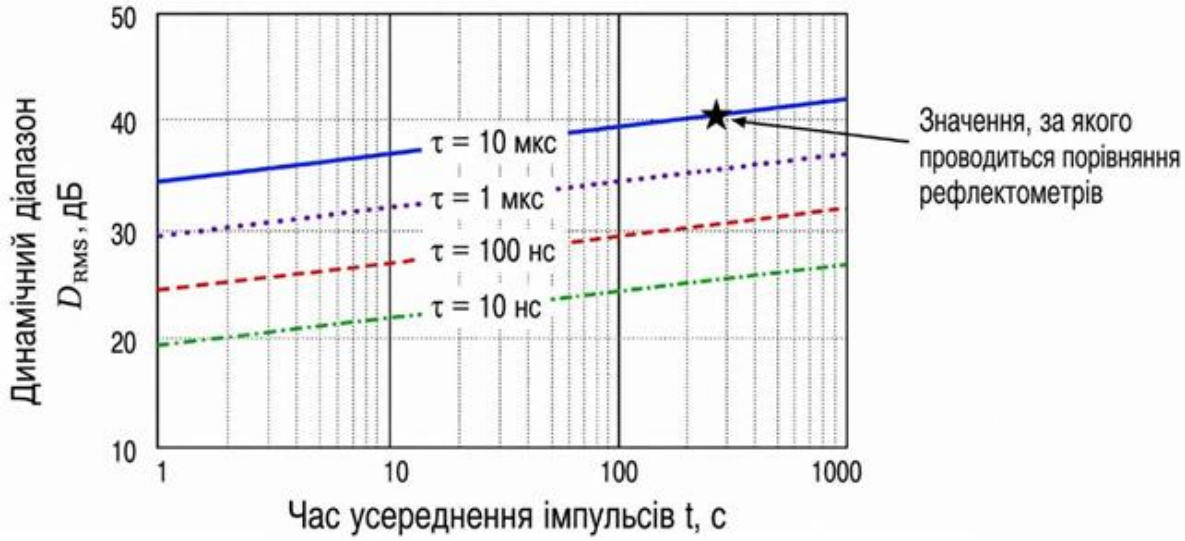


Рисунок 4.4 – Залежність величини динамічного діапазону OTDR (D_{RMS}) від часу усереднення і тривалості імпульсів

Зазначимо, що величина D_{RMS} рефлектометра, яка визначається вимірюванням при τ = 10 мкс та t = 3 хв., як це показано на рис. 4.4, застосовується у разі проведення вибору потрібної моделі OTDR для здійснення порівняння різних їх типів.

Також треба звернути увагу, що наведена вище методика аналізу та оцінки D_{RMS} не є кінцевою. Оптичні втрати в схемі OTDR (рис. 3.6) можна зменшити практично до 5 дБ, але у цьому випадку замість відгалужувача треба використовувати циркулятор (тут треба розуміти, що така модель OTDR буде мати значно більшу вартість). Потужність ДОВ можна збільшити до 23 дБ (якщо ще вище, то будуть проявлятися нелінійні спотворення). Також можна зробити кращою і порогову чутливість, тому що в нашому аналізі вона є гіршою (майже на 10 дБ) за квантову межу. Зокрема в сучасних моделях оптичних рефлектометрів динамічний діапазон підвищений порядку до 50 дБ.

ВИСНОВКИ

В представленій до розгляду бакалаврській роботі розглянуті основні фактори, що спричиняють виникнення втрат (загасання) у волоконному світловоді, та проаналізовані базові методи і підходи проведення їх вимірювань на основі обладнання оптичних тестерів і рефлектометрів.

У першому розділі цієї роботи розглянуто конструктивні особливості ВС, базові принципи поширення світла в них, а також основні типи оптичних волокон, що використовуються для організації лінії зв'язку у сучасних оптичних мережах. Зазначено, що ефективність передачі інформації по ВОЛЗ у значній мірі визначається конструкцією світловода, умовами розповсюдження в ньому світлових променів, кількістю мод та значенням його числової апертури. Зокрема показано, що залежно від закону зміни показника заломлення розрізняють світловоди зі східчастим і градієнтним профілем показника заломлення, а залежно від геометричних розмірів ВС, розрізняють багатомодові (MMF) та одномодові (SMF) світловоди. Описані основні категорії MMF та основні найпоширеніші типи SMF з огляду на рекомендації ITU-T G.652 - 657. Також показано, що у разі розповсюдження світла у різних типах ВС у залежності від кута, під яким воно потрапляє у ВС відносно його осі, в ньому можуть поширюватися випромінюючі, випливаючі і направляючі промені, причому перших два типи є паразитними і призводять до втрат. Діапазон кутів до оптичної осі, під якими світло потрапляє у ВС та поширюватися його серцевиною визначається числовою апертурою, яка є однією з важливіших характеристик світловода. У розділі розглянуті підходи щодо визначення величини NA, зокрема: номінальної, розрахункової, для градієнтних світловодів – локальної та ефективної. Зазначено, що важливою умовою зменшення втрат при з’єднанні ДОВ із ВС є їх відповідність потрібному значенню числової апертури [11, 12].

Далі у другому розділі цієї роботи зроблено загальний аналіз втрат за загасанням у ВС. Як відомо, загасання характеризує зменшення оптичної потужності при поширенні світла вздовж ВС і безпосередньо впливає на максимальну довжину регенераційної ділянки, на якій не потребується відновлення сигналу. Показано, що результуюче загасання формується під дією власних втрат у волокні, які зумовлені факторами поглинання і розсіювання оптичного випромінювання, а також дією додаткових кабельних втрат, які зумовлені факторами наявності у волокні втрат на мікро- і макровигини, а також

втрат, що вносяться роз'ємними і нероз'ємними з'єднаннями. Показані залежності величини загасання від частоти та довжини хвилі оптичного випромінювання. Зокрема визначені і обґрунтовані діапазони довжин хвиль (так звані вікна прозорості), у яких втрати є мінімальними. Зазначено, що ці діапазони є основою для визначення робочих довжин хвиль у ВОЛЗ (рисунок 2.2) [11].

У третьому розділі роботи було зроблено аналіз методів вимірювання загасання в волоконних світловодах. В рамках цього спочатку були проаналізовані принципи функціонування і конструктивні особливості оптичних тестерів (OLTS) та оптичних рефлектометрів (OTDR). Показано, що OLTS забезпечують досить точне вимірювання сумарних втрат в оптичній лінії, проте для сам процес проведення вимірювань потребує доступу до обох кінців ВС. Натомість OTDR дозволяють виконувати аналіз розподілу загасання вздовж усієї лінії, локалізувати неоднорідності та пошкодження, використовуючи доступ лише до одного кінця ВС. Зазначено, що вибір того або іншого вимірювального приладу, має ґрунтуватися відповідними потребами та задачами [16].

Зокрема OLTS застосовуються для здійснення моніторингу і контролю параметрів у ВС під час їх монтажу, введення в експлуатацію окремих оптичних ліній та подальшого їх технічного обслуговування. Вони мають простішу конструкцію та функціональну архітектуру, а базові принципи і підходи щодо проведення вимірювань є не дуже складними. У роботі детально проаналізовані два основних методи проведення вимірювань загасання у ВС із використанням OLTS згідно із Рек. ITU-T G.651, ITU-T G.652 та вимог, що регламентовані у ДСТУ 26814-86: метод обриву ВС та метод внесених втрат. Зазначено, що ці методи базуються на вимірюванні оптичної потужності, проте відрізняються порядком виконання вимірювань і способом визначення втрат у волокні [16].

Принцип вимірювань із використанням OTDR ґрунтується на введенні у світловод коротких зондуючих імпульсів і здійсненні подальшої інтерпретації частини оптичного світла, що повертається у зворотному напрямку до фотоприймача внаслідок ефектів зворотного Релеївського розсіювання та відбиття від неоднорідностей. У результаті таких підходів щодо проведення вимірювань формується і виводиться на дисплей OTDR рефлектограма, яка відображає розподіл рівня ЗРР-сигналу, що розсіюється вздовж лінії, що тестується. Тому такі вимірювання називаються рефлектометричними, а їх спосіб представлення результатів забезпечує можливість як візуального аналізу стану ВС, так і автоматизованого визначення його основних параметрів. В наслідок цього

прилади OTDR більш складні у використанні в порівнянні з OLTS і потребують спеціальної підготовки оператора для того щоб, мати можливість правильно аналізувати рефлектограму і робити відповідні висновки [22, 24].

У роботі також звертається особлива увага на те, що однією з основних найважливіших характеристик оптичного рефлектометра є його динамічний діапазон. В рамках теми кваліфікаційної роботи і поставлених до неї у технічному завданні задач було встановлено, що динамічний діапазон визначає максимальну величину загасання, яка може бути достовірно виміряна за допомогою OTDR. Зі збільшенням динамічного діапазону зростає максимальна довжина світловода, що тестується, та допустима величина сумарних втрат, які можуть бути визначені без істотного зниження точності вимірювань. Акцентується, що у випадку, коли сумарне загасання у лінії перевищує значення динамічного діапазону рефлектометра, рівень сигналу ЗРР на віддалених ділянках світловода стає співрозмірним із рівнем шумів у вимірювальному тракті. Це ускладнює точне визначення загасання та локалізацію неоднорідностей у ВС. Тобто фізичний зміст динамічного діапазону оптичного рефлектометра полягає у визначенні максимально допустимих втрат у лінії, які оцінюються як різниця між рівнями сигналу ЗРР на початку та в кінці рефлектограми, що проілюстровано на рисунку 4.1 пояснювальної записки. Але кінець рефлектограми можна з потрібною достовірністю проаналізувати лише за умови, що рівень зворотно-розсіяного сигналу буде перевищувати рівень шумів. У зв’язку з тим, що більшість компаній, що виробляє OTDR, визначають рівень шуму не за його піковим (максимальним) значенням, а за його середньоквадратичним значенням (RMS), то можна більш об'єктивно здійснити оцінку середнього рівня шумової складової сигналу, що вимірюється [22].

У роботі показано, що у разі визначення динамічного діапазону по RMS-шуму (D_{RMS}), його величина буде на 1,8 дБ більшою за величину динамічного діапазону, яка може бути визначена по піковому значенню шуму. Це пояснюється тим, що RMS шум є меншим за його пікове значення, а отже, надає більш оптимістичну оцінку динамічних можливостей OTDR. Методика аналізу та оцінки D_{RMS} оптичного рефлектометра ґрунтовно описані в четвертому розділі роботи. Орієнтуючись на проведений у роботі аналіз були визначені та задані необхідні параметри, згідно яких був отриманий D_{RMS} = 41,5 дБ. Також зазначено, що величина D_{RMS} оптичного рефлектометра при τ = 10 мкс та t = 3 хв. застосовується у разі вибору потрібної моделі OTDR на основі порівняння різних моделей і типів між собою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Оптичне волокно: принцип роботи, склад та застосування [Електронний ресурс] // SoyuzTelecom. – 2026. – Режим доступу до ресурсу: https://soyuztelecom.ua/optichne-volokno-princzip-roboti-sklad-ta-zastosuvannya/

2. Keiser G. Optical Fiber Communications [Електронний ресурс] / Gerd Keiser // New York, McGraw-Hill, Inc. – 2010. – 690 p. – Режим доступу до ресурсу: https://www.slideshare.net/slideshow/gerd-keiser-optical-fiber-communicationsmcgrawhill-education-2010pdf/252502760#5

3. Govind P. Agrawal. Fiber-Optic Communication Systems [Електронний ресурс] // John Wiley & Sons, Inc. – 2010. – 610 p. – Режим доступу до ресурсу: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470918524.

4. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: учеб. пособие. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 271 с.

5. Онищук О.В. Аналіз загасання у волоконно-оптичній лінії зв’язку [Електронний ресурс] / О.В. Онищук, К.О. Коваль // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №2. – 2014. – С. 129 - 133. – Режим доступу до ресурсу: https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/394.

6. Розорінов Г.М. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв’язку: навч. посіб. / Г.М. Розорінов, Д.О. Соловйов. – К.: «Кафедра», 2012. – 344 с.

7. Колтун Ю.М. Моніторинг параметрів в оптичних системах WDM із застосуванням OTDR/ Ю.М. Колтун, В.І. Чебаненко, // матеріали 13-ої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». Том 1. – Баку – Харків – Бельсько-Бяла. – 27 - 28 листопада, 2025 р. – С. 100 - 101. DOI: https://doi.org/10.32620/PI.25.t1

8. Савин Е.З. Волоконнооптические кабели и пассивные компоненты ВОЛП: учеб. пособ. – ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 223 с.

9. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи / И.И. Гроднев. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.

10. Принципы работы волоконно-оптического кабеля [Електронний ресурс] // ВОЛС.ЭКСПЕРТ. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: https://vols.expert/useful-information/princzipy-raboty-opticheskogo-kabelya/.

11. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Напрямні системи електричного та оптичного зв'язку» (частина 2)» підготовки бакалавра напряму 6.050903 «Телекомунікації» / Розробник Ю.М. Колтун, доц. каф. ІМІ, к.т.н. – Харків: ХНУРЕ, 2017 р. – 237 с.

12. Одномодовые и многомодовые оптические кабели [Електронний ресурс] // ВОЛС.ЭКСПЕРТ. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://vols.expert/useful-information/odnomodovye-i-mnogomodovye-kabeli/.

13. Виды оптических волокон [Електронний ресурс] // ООО «ОптТек» (Modultech). – 2022. – Режим доступу до ресурсу: https://modultech.ru/opticheskoe-volokno-printsip-raboty-vidy/?srsltid=AfmBOoq9cFNFaf2mKyXtzFSfgKCF8csJd2d2dO1vT92snYTmXzA6s17L.

14. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Тренз, 1998. – 268 с.

15. Что за параметр «модовое поле» и на что оно влияет? [Електронний ресурс] / ВОЛС.ЭКСПЕРТ. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: https://vols.expert/faq/chto-za-parametr-modovoe-pole-i-na-chto-ono-vliyaet/.

16. Смирнов И. Измерения на ВОЛС [Електронний ресурс] / Илья Смирнов // УЦ «ВОЛС. Эксперт». – 2023. – Режим доступу до ресурсу: https://vols.expert/useful-information/izmereniya-vols/#причины-потерь-в-оптоволокне.

17. Вимірювання загасання оптичних волокон оптичним тестером [Електронний ресурс] / Г. Г. Кущ, А. Е. Мандель. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: https://edu.study.tusur.ru/publications/3735/download.

18. FHM2 Series Optical Multimeter [Електронний ресурс] // Grandway Telecom Tech. – Доступ здійснено 21.06.2026. – Режим доступу до ресурсу: https://www.grandwaytelecom.com/products/instrument/other-meters/1395.html.

19. Grandway FHM2A01 - оптичний тестер, вимірювач потужності (від -70 до +10 дБм), джерело сигналу (1310/1550 нм) [Електронний ресурс] // «Залізний Гаррі» (м. Київ) – Доступ здійснено 21.06.2026. – Режим доступу до ресурсу: https://iron-harry.ua/tovar/63125/.

20. Иванова С.М. Обзор методов контроля первичных параметров оптического волокна [Електронний ресурс] / С.М. Иванова, О.В. Елисеев, А.С. Михайличенко, О.Л. Студеникин. – Доступ здійснено 22.06.2026. – Режим доступу до ресурсу: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-pervichnyh-parametrov-opticheskogo-volokna.

21. Бабак В.М. Аналіз методологічних принципів вимірювань і моніторингу параметрів оптичних волокон у сучасних ВОЛЗ [Електронний ресурс] / В.М. Бабак // магістерська кваліфікаційна робота. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 86 с. – Режим доступу до ресурсу: https://openarchive.nure.ua/bitstreams/384ce356-76a8-4aa8-ad85-19b214ea0815/download.

22. Листвин А.В. Рефлектометрия оптических волокон / А.В. Листвин, В.Н. Листвин – М.: ЛЕСАРарт, 2005. – 208 с.

23. Вимірювання в оптичних кабельних мережах [Електронний ресурс] // Відділ волоконно-оптичних технологій і кабельних мереж компанії ДЕПС. – Доступ здійснено 25.06.2026. – Режим доступу до ресурсу: https://deps.ua/ua/knowegable-base/articles/vymir-v-opticheskih-kabelnyih-setyah.html.

24. Чебаненко Вячеслав Аналіз методів вимірювання параметрів ВОЛЗ з використанням оптичного рефлектометра / Вячеслав Чебаненко // магістерська кваліфікаційна робота. – Харків: ХНУРЕ, 2025. – 75 с.