

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

(повна назва)

Кафедра

Інформаційно-мережної інженерії

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Аналіз методів вимірювання параметрів ВОЛЗ з використанням
оптичного рефлектометра

(тема)

Виконав:

здобувач 2024 року навчання,
групи ІМІзм-24-1

Вячеслав ЧЕБАНЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 172 Електронні комунікації та
радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційно-мережна
інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Юрій КОЛТУН

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Микола МОСКАЛЕЦЬ

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

/ Вячеслав ЧЕБАНЕНКО /

Керівник

/ Юрій КОЛТУН /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 172 Електронні комунікації 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)

« 20 » жовтня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Чебаненку Вячеславу Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз методів вимірювання параметрів ВОЛЗ з використанням оптичного рефлектометра
затверджена наказом університету від « 20 » жовтня 2025 р. № 179 Стз
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 22 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Технологічна спрямованість проведення аналізу і досліджень – ВОЛЗ на основі SSMF. Основний тип рефлектометрів: OTDR, OFDR. Базові методи рефлектометрії: когерентна і некогерентна.
Проаналізувати конструктивні особливості, принципи роботи та технічні параметри рефлектометрів. Дослідити методи рефлектометрії, що застосовуються для вимірювань параметрів у ВОЛЗ. Зробити оцінку їх роздільної здатності і динамічного діапазону та надати методика визначення параметрів зондуючого сигналу.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі.
Вступ

1. Загальні особливості розповсюдження світла по оптичному волокну та основні типи втрат.

2. Конструктивні особливості, принцип роботи та основні технічні параметри оптичних рефлектометрів.

3. Методи рефлектометрії, що застосовуються для вимірювань параметрів у ВОЛЗ.

4. Типова методика визначення параметрів зондуючого сигналу на ос обґрунтування моделі оптичного волокна.

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайди у форматі Power Point (назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи, принципи розповсюдження світла в оптичних волокнах, типи ОВ та їх робочі діапазони за довжин хвиль, основні типи втрат у оптичному волокні та пристрої для проведення вимірювань, основні підходи до вимірювання втрат OLTS, фізична модель процесу вимірювань OTDR та його конструктивні особливості, рефлектометрія та основні технічні параметри оптичного рефлектометра, визначення основних технічних параметрів оптичного рефлектометра, методи рефлектометрії, що застосовуються для вимірювань параметрів у ВОЛЗ, висновки).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	20.10 – 27.10.25	виконано
2	Підбір літератури за темою роботи.	28.10 – 03.11.25	виконано
3	Виконання розділу 1	04.11 – 11.11.25	виконано
4	Виконання розділу 2	12.11 – 22.11.25	виконано
5	Виконання розділу 3	23.11 – 04.12.25	виконано
6	Виконання розділу 4	05.12 – 14.12.25	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	15.12 – 17.12.25	виконано
7	Оформлення презентаційного матеріалу та подання роботи до ЕК	18.12 – 22.12.25	виконано
8	Підготовка до захисту та захист у ЕК	23.12 – 29.12.25	виконано

Дата видачі завдання 20 жовтня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

(доц.Юрій КОЛТУН)
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 75 с., 24 рис., 2 табл., 25 джерел, 2 додатки.

ВОЛЗ, ОПТИЧНИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР, ІМПУЛЬСНИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР, OTDR, ЧАСТОТНА РЕФЛЕКТОМЕТРІЯ, OFDR, ОПТИЧНИЙ ТЕСТЕР, OLTS, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ, ВТРАТИ, РЕФЛЕКТОГРАМА, ДИНАМІЧНИЙ ДІАПАЗОН, МЕРТВІ ЗОНИ, ЗОНДУЮЧИЙ ІМПУЛЬС, РЕФЛЕКТОМЕТРІЯ

Об'єкт дослідження – оптичний рефлектометр, OTDR, OFDR.

Мета роботи – аналіз методів проведення рефлектометрії параметрів ВОЛЗ з використанням рефлектометрів, а також методика обробки результатів оптичної рефлектометрії і оцінки їх технічних параметрів для збільшення точності та достовірності результатів вимірювання характеристик оптичних волокон.

Проведено комплексний аналіз сучасних методів оптичної рефлектометрії, що застосовуються для вимірювання параметрів ВОЛЗ. Проаналізовані методи оптичної рефлектометрії у частотній області (OFDR), які забезпечують розподілене зондування оптичного волокна з використанням частотної або часової обробки сигналів. Зокрема розглянуті некогерентні (I-OFDR) та когерентні методи C-OFDR. Проведена оцінка роздільної здатності і динамічного діапазону методів OFDR і OTDR. Надана методика визначення параметрів зондуючого сигналу на основі обґрунтування моделі ОБ.

THE ABSTRACT

Explanatory note 75 pages, 24 fig., 2 tab., 25 sources, 2 app.

VOLZ, OPTICAL REFLECTOMETER, PULSE REFLECTOMETER, OTDR, FREQUENCY REFLECTOMETRY, OFDR, OPTICAL TESTER, OLTS, OPTICAL FIBER, INDEX OF REFRACTION, LOSSES, REFLECTOGRAM, DYNAMIC RANGE, DEAD ZONES, PROBING PULSE, REFLECTOMETRY

Object of research – optical reflectometer, OTDR, OFDR.

The purpose of work – analysis methods for conducting reflectometry of optical fiber parameters using reflectometers, as well as methods for processing the results of optical reflectometry and evaluating their technical parameters to increase the accuracy and reliability of the results of measuring the characteristics of optical fibers.

A comprehensive analysis of modern optical reflectometry methods used to measure optical fiber parameters has been conducted. Frequency domain optical reflectometry (OFDR) methods that provide distributed optical fiber probing using frequency or time signal processing have been analyzed. In particular, incoherent (I-OFDR) and coherent C-OFDR methods are considered. An assessment of the resolution and dynamic range of OFDR and OTDR methods is performed. A method for determining the parameters of the probing signal based on the justification of the OF model is provided.

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 ЗАГАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СВІТЛА ПО ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНУ ТА ОСНОВНІ ТИПИ ВТРАТ	11
1.1 Конструктивні особливості та типи ОВ.....	11
1.2 Особливості розповсюдження світла по ОВ	15
1.3 Основні типи втрат в оптичному волокні.....	18
1.4 Пристрої для проведення вимірювань втрат у ОВ	23
2 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ, ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОПТИЧНИХ РЕФЛЕКТОМЕТРІВ	28
2.1 Функціональна схема OTDR.....	28
2.2 Принцип роботи OTDR	30
2.3 Склад і підходи до аналізу типової рефлектограми	32
2.4 Основні технічні параметри оптичного рефлектометра	34
3 МЕТОДИ РЕФЛЕКТОМЕТРІЇ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ У ВОЛЗ.....	43
3.1 Когерентна рефлектометрія	43
3.2 Частотна рефлектометрія	45
3.2.1 Некогерентна частотна рефлектометрія	46
3.2.2 Когерентна частотна рефлектометрія	48
3.3 Оцінка роздільної здатності і динамічного діапазону методів OFDR і OTDR	49
4 ТИПОВА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОНДУЮЧОГО СИГНАЛУ НА ОСНОВІ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА	53
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	60
ДОДАТОК А ПУБЛІКАЦІЇ.....	63
ДОДАТОК Б СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	68

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- ADZ (Attenuation Dead Zone) – мертва зона за загасанням;
- C-OTDR (Coherent OTDR) – когерентний оптичний рефлектометр у часовій області;
- DCD (Dispersion Compensation Device) – пристрої компенсації дисперсії;
- DSF (Dispersion Shifted Fiber) – волокно зі зміщеною дисперсією;
- EDZ (Event Dead Zone,) – подія «мертва зона»;
- FWHM (Full-Width at Half-Maximum) – повна ширина при половині максимального значення;
- IEC (International Electrotechnical Commission) – міжнародна електротехнічна комісія;
- MMF (Multi Mode Fiber) – багатомодове оптичне волокно;
- NA (Numerical Aperture) – числова апертура;
- OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometr) – оптичний рефлектометр частотної області;
- OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) – оптичний часово-імпульсний рефлектометр;
- OLTS (Optical Loss Test Set) – оптичний тестер для вимірювання втрат;
- RMS (Root Mean Square) – середньоквадратичне значення;
- SMF (Single Mode Fiber) – одномодове оптичне волокно;
- WDM (Wavelength Division Multiplexing) – спектральне (хвильове) мультиплексування.
- АЦП – аналого-цифрове перетворення;
- ВОК – волоконно-оптичний кабель;
- ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;
- ОВ – оптичне волокно;
- ПРЗ – просторова роздільна здатність;
- РЗ – роздільна здатність;

ВСТУП

Надійність та ефективність функціонування сучасних волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) визначаються стабільністю параметрів та експлуатаційних характеристик оптичних волокон (ОВ) як їх середовища передачі. В умовах постійного зростання обсягів інформації, що передається, ускладнення топологій мереж, необхідності збільшення пропускної здатності та ефективності її використання зростає необхідність забезпечити постійний моніторинг і реалізувати високоточні вимірювання стану як ОВ, так і в цілому волоконно-оптичного кабелю (ВОК), який є основною складовою будь якої ВОЛЗ. Зокрема, ВОК і ОВ, як його основний елемент, по якому передаються оптичні сигнали, є чутливими до механічних і температурних впливів, різного роду деформацій і впливу навколишнього середовища, що призводить до зміни рівня оптичних втрат, виникнення мікронерівностей, мікро- і макровигинів, а в деяких випадках і серйозним аварійним ситуаціям, що вимагають заміни кабельних сегментів [1, 2].

Особливе значення серед характеристик, що підлягають моніторингу та вимірюванням, мають коефіцієнти загасання та дисперсії, рівномірність розсіювання, рівень відбиття, наявність точкових дефектів, зварних з'єднань та відгалужень, а також розподіл напружень уздовж оптичного волокна в результаті його натягіння. Так, за даними досліджень, проведених компанією Corning (США), яка є одним з провідних вендорів в області створення і виробництва ВОК і оптичних волокон, для безвідмовного і тривалого (не менше 250000 годин і 25 - 30 років відповідно) функціонування оптичного кабелю, відносне натягіння волокна в ньому при тривалому навантаженні не повинно перевищувати 0,3%, при якому ймовірність обриву становитиме 0,284. У разі досягнення цього значення в 0,6%, ймовірність обриву збільшується до 0,787, що може призвести до виходу ВОК з ладу вже протягом першого року експлуатації. У зв'язку з цим, контроль натягіння оптичного волокна повинен проводитися на всіх етапах виробництва кабелю [3].

Таким чином, вищезазначені характеристики визначають якість передачі оптичного сигналу і впливають на стійкість роботи систем зв'язку, особливо у високонавантажених конфігураціях, таких як сімейство оптичних систем на основі спектрального мультиплексування каналів (Wavelength Division Multiplexing, WDM). У таких системах наявність мультиплексорів, демультіплексорів і проміжних оптичних вузлів значно ускладнює процес діагностики традиційними методами,

оскільки в них усі параметри, що впливають на ефективність і цілісність передачі, потрібно вимірювати на довжині хвилі кожного канального інтервалу [2, 4].

Одним з найбільш ефективних інструментів контролю оптичних волокон є оптичні рефлектометри, що використовують імпульсний принцип реєстрації відбитого і розсіяного випромінювання (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR). Їх застосування дозволяє проводити комплексний аналіз розподілу оптичних втрат, виділяти ділянки з деградацією характеристик ОВ, визначати координати пошкоджень з високою точністю і діагностувати зміни, що пов'язані з механічними впливами на волокно. Крім того, OTDR надає можливість оцінки параметрів зварних з'єднань волокон, підтвердження коректності монтажу і виявлення дефектів, що виникають при будівництві та експлуатації ВОЛЗ [2, 5, 6].

Крім OTDR, існують різні методи і режими вимірювань (методи рефлектометрії) з використанням рефлектометрів: частотна рефлектометрія на основі рефлектометрів OFDR, когерентна і не когерентна рефлектометрія, вимірювання зворотного розсіювання Релея, довгоімпульсні і короткоімпульсні режими, тощо. У разі роботи із системами сімейства WDM особливого значення набувають джерела, що переналаштовуються за довжиною хвилі, які дозволяють проводити діагностику в межах їх хвильових канальних інтервалів, обходячи селективність пасивних компонентів. Це істотно розширює можливості моніторингу та забезпечує коректні вимірювання й оцінку параметрів кожної ділянки лінії [2, 5, 6].

Застосування методів рефлектометрії з використанням різних оптичних рефлектометрів забезпечує ряд істотних переваг: високу точність локалізації дефектів, можливість аналізу прихованих пошкоджень, неруйнівний характер вимірювань, оперативність отримання результатів і мінімальну залежність якості діагностики від умов експлуатації ВОЛЗ. Однак вартість сучасного вимірювального обладнання такого типу і складність його обслуговування є обмежувачими факторами для масового застосування широкого спектру рефлектометричних методів. Тому актуальною задачею є пошук моделей, підходів і алгоритмів, що спрямовані на оптимізацію обробки рефлектограм, підвищення точності проведення вимірювань і зниження залежності результатів, що отримуються, від кваліфікації оператора [2, 5, 6].

Звідси метою виконання цієї кваліфікаційної роботи є аналіз методів проведення вимірювань параметрів ВОЛЗ з використанням оптичних рефлектометрів, а також методика обробки результатів оптичної рефлектометрії і оцінки їх технічних параметрів для збільшення точності та достовірності результатів вимірювання характеристик оптичних волокон.

1 ЗАГАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СВІТЛА ПО ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНУ ТА ОСНОВНІ ТИПИ ВТРАТ

1.1 Конструктивні особливості та типи ОВ

Як вже було зазначено, оптичне волокно є основним елементом волоконно-оптичного кабелю, а той, у свою чергу, є основним складовим компонентом при організації будь-яких типів ВОЛЗ. ОВ, як середовище розповсюдження світла, являє собою діелектричний хвилевід, що здійснює направлену передачу оптичного випромінювання та виготовляється із кварцового скла (або для спеціальних цілей – пластику) у вигляді тонкої волосіні циліндричної форми з круглим поперековим перерізом. ОВ за своєю конструкцією має серцевину з показником заломлення світла n_1 , яка оточена оболонкою з показником заломлення n_2 (рис. 1.1) [7, 8].

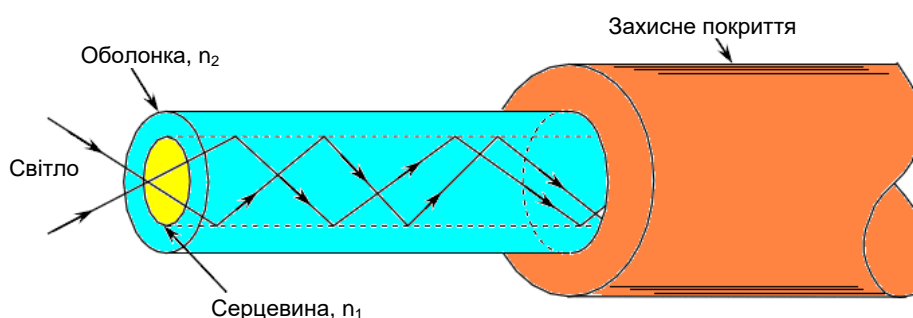


Рисунок 1.1 – Загальні конструктивні особливості оптичного волокна

У конструкції ОВ серцевина забезпечує передачу оптичного сигналу, а оболонка забезпечує для цього сприйнятливі умови. Зокрема, оболонка формує умови для здійснення відбиття світла на границі «серцевина-оболонка» і забезпечує захист від можливих негативних впливів оточуючого навколишнього середовища. Вона також може виготовлятися з кварцу або полімеру. Крім того, для підвищення міцності ОВ і тим самим його надійності зверху оболонки накладаються захисні покриття та покриття для зміцнення конструкції волокна [7, 8]

Треба звернути увагу на те, що для передачі світла по серцевині ОВ має виконуватися наступна умова: $n_1 > n_2$. Тут треба звернути увагу на те, що n_2 є

меншим від n_1 близько на 1% (типovими їх значеннями є $n_1 = 1,47$, а $n_2 = 1,46$), тобто серцевина ОВ являє собою оптично більш щільне середовище ніж оболонка. Загалом показник заломлення визначається як відношення швидкості світла у вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с) до швидкості світла в конкретній речовині (v , для кварцу $v = 1,93 - 2,06 \cdot 10^8$ м/с). Також треба зазначити, що n_2 має постійне значення, а величина n_1 може змінюється по діаметру поперечного перерізу ОВ. Така зміна n по діаметру ОВ називається профілем показника заломлення [7, 9].

По волокну може розповсюджуватися одна або більше оптичних хвиль. В залежно від цього їх поділяють на два типи: одномодові (Single Mode Fiber, SMF) і багатомодові (Multi Mode Fiber, MMF). Одномодові волокна мають відносно невеликі дисперсійні впливи, більшу пропускну здатність і, відповідно, можливість передавати оптичний сигнал на більшу відстань з потрібною якістю без регенерації. На сьогодні застосування SMF є найбільш перспективним з точки зору організації ВОЛЗ. Сигнали, що поширюються по багатомодових волокнах більше схильні до впливу дисперсії, що, у свою чергу, значно обмежує як пропускну здатність ОВ, так і дальність передачі [7, 8].

Для визначення параметрів ОВ дуже важливим є знати профіль показника заломлення. Зокрема волокна MMF бувають двох основних типів: зі східчастим і градієнтним профілями показника заломлення.

У східчастому MMF показник n_1 має постійне значення за радіусом. Показник n_2 теж, проте він відрізняється приблизно в 1,4 рази, утворюючи сходинку на границі «серцевина-оболонка» (рис. 1.2, а). Світлові імпульси, що поширюються по такому MMF, піддаються впливу дисперсії (розширюються), оскільки промені, що розповсюджуються під малими кутами, проходять шлях швидше, ніж промені з великими кутами. Це обмежує максимальну частоту проходження імпульсів і знижує швидкість передачі даних [7, 10].

Для усунення зазначеного ефекту були розроблені градієнтні MMF, в яких n_1 плавно зменшується від центру до границі «серцевина-оболонка» (рис. 1.2 б). Ядро таких волокон складається з численних шарів скла, в кожному з яких поступово знижується n_1 . Промінь світла в них внаслідок заломлення поширюється по викривленій траєкторії, що є близькою до синусоїди, значну частину шляху проходячи в областях з меншим n_1 , тобто з більшою швидкістю. Таким чином відбувається компенсація збільшення довжини шляху, тобто чим більше номер моди, тим довший шлях вона проходить, але тим більшу частину

часу світло буде рухатись по периферійних областях з меншими значеннями показника заломлення [7, 10].

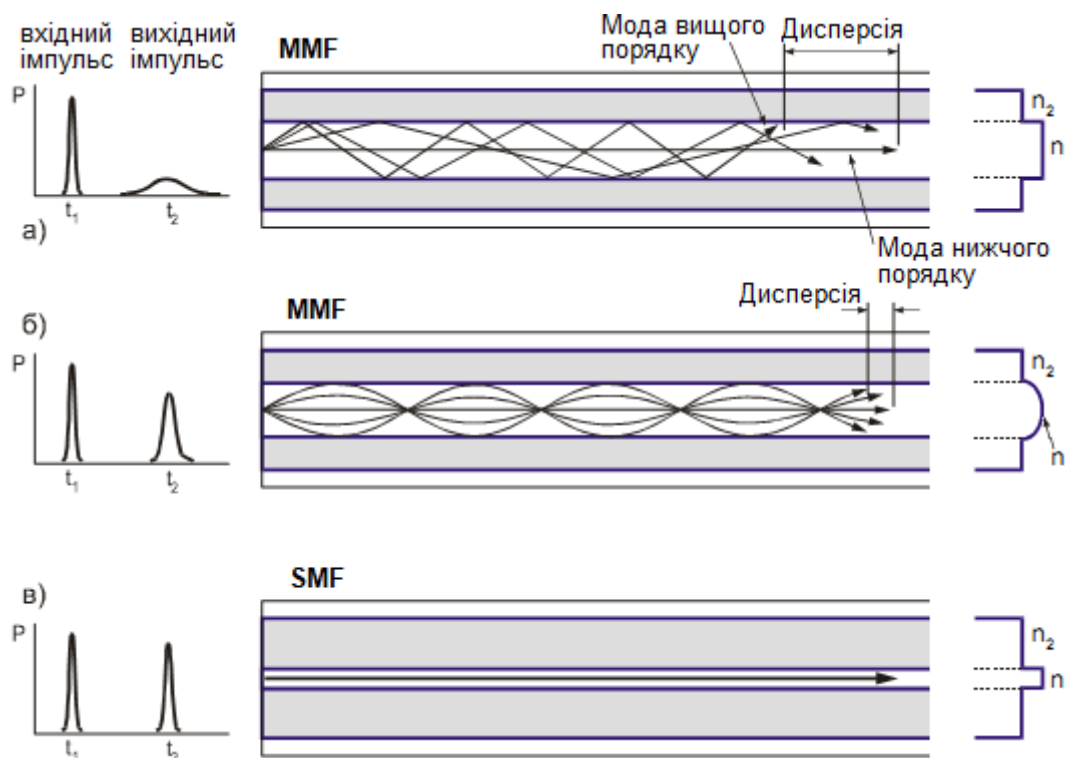


Рисунок 1.2 – Основні типи ОВ за профілем показника заломлення

Для волокон SMF закон зміни показника заломлення усередині серцевини не має істотного значення, але за поданням його вважають близьким до східчастого того (рис. 1.2, в) [7, 10].

Треба зазначити, що волокна MMF працюють на довжинах хвиль $\lambda = 850$ нм та $\lambda = 1310$ нм. Волокна SMF працюють на $\lambda = 1310$ нм і $\lambda = 1550$ нм. Ці довжини хвиль називаються робочими (або несучими) у так званих «вікнах прозорості» або у робочих діапазонах довжин хвиль оптичного випромінювання світловодів. Особливістю цих «вікон прозорості» є те, що в них спостерігаються мінімальні оптичні втрати (зокрема мінімальне загасання випромінювання, що поширюється по ОВ) (рис. 1.3) [7, 11].

У першому вікні прозорості ($\lambda = 850$ нм) втрати в ОВ є найбільшими: близько 2-3 дБ/км. Тому у цьому робочому діапазоні використовуються MMF для організації коротких оптичних ліній (наприклад, оптичні шнури для підключення обладнання, здійснюється підключення абонентів до ONU для подальшого доступу до Інтернету, організуються сегменти в офісних локальних мережах, тощо) [7].

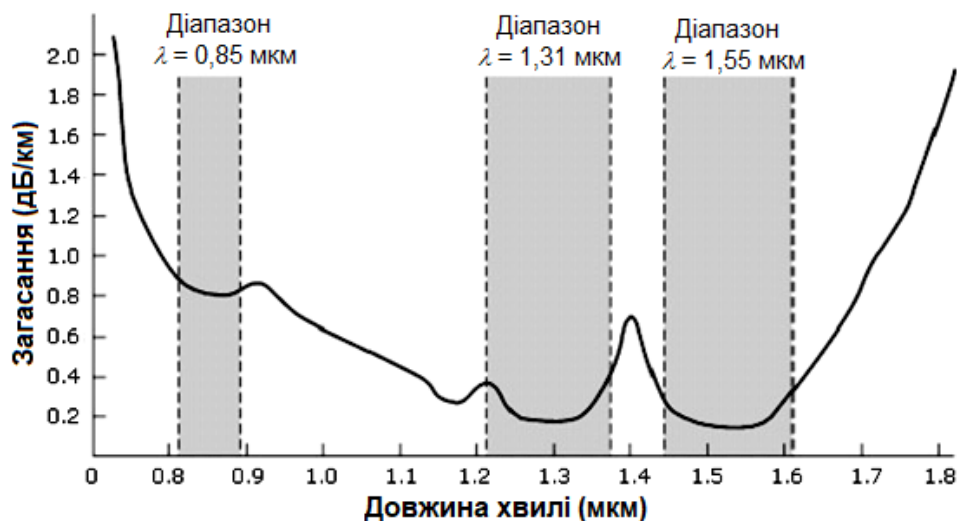


Рисунок 1.3 – Робочі діапазони довжин хвиль оптичного випромінювання («вікна прозорості») ОВ

У другому вікні ($\lambda = 1310$ нм) рівень втрат є значно нижчим: близько 0,75-1,5 дБ/км для волокон MMF і 0,3-0,5 дБ/км для SMF, що дозволяє використовувати його для організації транспортних оптичних магістралей міських і регіональних мереж [7].

Третє вікно прозорості ($\lambda = 1550$ нм) характеризується наймінімальнішими втратами: 0,18-0,25 дБ/км і нижче, що робить його оптимальним для організації ВОЛЗ дальнього зв'язку на SMF. На сьогоднішній день саме цей робочий діапазон є найбільш цікавим з практичної точки зору завдяки поєднанню мінімальних втрат і високої пропускної здатності ОВ [7, 11].

Зазначимо також, що з точки зору впливу дисперсійних характеристик оптимальний режим передачі світла досягається в другому «вікні прозорості» ($\lambda = 1310$ нм). На цій хвилі практично є відсутньою хроматична дисперсія, тому $\lambda = 1310$ нм також називається довжиною хвилі нульової дисперсії (λ_0). Однак, незважаючи на цю перевагу, вона не зовсім підходить для організації ВОЛЗ дальнього зв'язку, оскільки низький рівень дисперсії може стати причиною посилення небажаних впливів від нелінійних ефектів, що виникають в ОВ. У той же час, на $\lambda = 1550$ нм (третє «вікно прозорості», яке використовується для організації ВОЛЗ дальньої передачі), хроматична дисперсія в стандартних SMF є істотною (близько 17-20 пс/нм·км). Для вирішення цієї проблеми застосовуються або спеціальні пристрої, що здійснюють компенсацію дисперсії (Dispersion Compensation Device, DCD), або використовуються ОВ з модифікованими дисперсійними властивостями, такі як волокна зі зміщеною дисперсією (Dispersion Shifted Fiber, DSF) [7, 11, 12].

1.2 Особливості розповсюдження світла по ОВ

Особливості розповсюдження світла по ОВ ґрунтується на явищі повного внутрішнього відбиття, яке виникає на границі діелектричних середовищ, що мають різні n . Це явище є наслідком закону заломлення світла, який був сформульований Снеліусом та у математичній інтерпретації має наступний вигляд [7]:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2, \quad (1.1)$$

де φ_1 – кут падіння,

φ_2 – кут заломлення.

Тобто закон заломлення світла Снеліуса говорить про те, що відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є рівним зворотному відношенню відповідних показників заломлення [7].

Виходячи із закону Снеліуса, у разі, коли промінь світла, який розповсюджується в середовищі серцевини з показником n_1 , зустріне границю із середовищем оболонки із меншим показником n_2 , то кут φ_2 у середовищі з n_2 буде більшим, ніж кут падіння φ_1 . Якщо буде зростати кут φ_1 , то буде і зростати кут φ_2 . Тому що $\varphi_2 > \varphi_1$, то очевидно, що кут φ_2 буде рівним 90° раніше, ніж кут φ_1 . Кут падіння, для якого $\varphi_2 = 90^\circ$ (тобто заломлений промінь світла просувається по поверхні розподілу), отримав назву кута повного внутрішнього відбиття (φ_c) або критичним кутом падіння (рис. 1.4) [7, 8].

Цей кут можна визначити із виразу (1.1), що був записаний для інтерпретації закону Снеліуса, але з урахуванням того, що $\varphi_2 = 90^\circ$ [7]:

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \varphi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.2)$$

Тут важливим є те, що у разі $\varphi_1 > \varphi_c$ (промінь 3 на рис. 1.4), то цей промінь не перетікає у оболонку, а повністю відбивається всередину серцевини ОВ. Саме ця особливість, що заснована на принципі повного внутрішнього відбиття, і дозволяє здійснювати розповсюдження світла по оптичним волокнам [7].

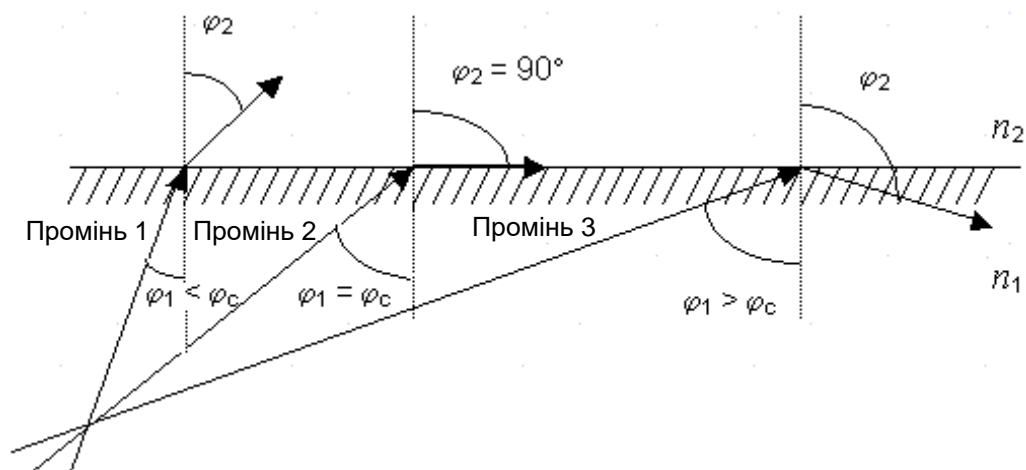


Рисунок 1.4 – Розповсюдження променів світла у середовищах при різних φ_1

Треба звернути увагу на те, що у відповідності до значення кута φ , який формують із віссю ОВ промені світлового випромінювання у разі потрапляння на його торець, у ньому здійснюється розповсюдження трьох основних видів променів: випромінюючих (1), впливаючих (2) та направляючих (3) (рис. 1.5) [7, 12].

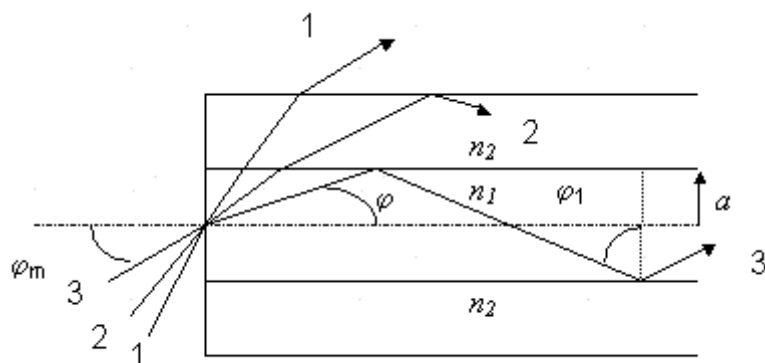


Рисунок 1.5 – Розповсюдження променів світлового випромінювання по ОВ

Промені світла, які виходять із оболонки в навколишній простір (рис. 1.5, 1-й промінь) створюються у місцях, де є в наявності нерегулярності або через скручування світловодів. Промені світла, які потрапляють на границю «серцевина-оболонка» під кутами $\varphi < \varphi_c$ (рис. 1.5, 2-й промінь), зветься впливаючими променями або променями оболонки. На границі «серцевина-оболонка» ці промені відбиваються та заломлюються, за рахунок чого втрачають в оболонці ОВ частину своєї енергії, і, в решті решт, зникають на деякій відстані від торця світловода. Промені світла, які потрапляють на границю «серцевина-оболонка» під кутом $\varphi \geq \varphi_c$ (рис. 1.5, 3-й промінь), відбиваються від неї прямо в серцевину ОВ та далі поширюються по ній. Такі промені називаються

направляючими. Треба звернути увагу, що промені світла, які випромінюються з оболонки ОВ та впливаючі промені відносяться до паразитних і призводять до розсіювання енергії оптичного випромінювання та спотворення інформаційного оптичного сигналу [7, 12].

Слід також звернути увагу, що найважливішою характеристикою ОВ, що визначає особливості розповсюдження світла по ньому, є числова апертура (Numerical Aperture, NA). Вона показує, наскільки ефективно волокно може захоплювати світло, що падає на його торець. Як видно з рисунку 1.5, промені входять в ОВ під різними кутами до його осі. Промені, що входять під занадто великими кутами, залишають сердцевину і поглинаються оболонкою або випромінюються далі за її межі. Інша частина поширюється до іншого кінця ОВ. Існує граничний кут (апертурний кут, φ_m , рис. 1.6) між оптичною віссю і утворюючою світлового конуса, при якому промінь залишається всередині сердцевини. Величина, що відповідає цьому куту, називається номінальною числовою апертурою і описується виразом [7]:

$$NA = n_0 \sin \varphi_m, \quad (1.3)$$

де n_0 – показник заломлення середовища, що оточує ОВ (зокрема для повітря $n_0 = 1$).

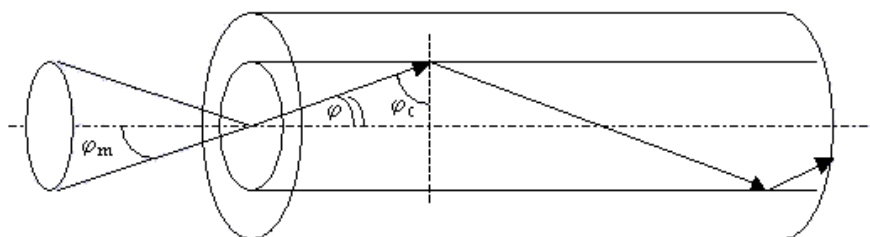


Рисунок 1.6 – До визначення номінальної числової апертури

Від значення цього показника залежать ефективність вводу оптичного випромінювання у ОВ від джерела (лазера або світлодіода), втрати на мікровигинах, дисперсія імпульсів, число мод, що поширюються по волокну. Також треба мати на увазі, що рівність числових апертур оптичного джерела і приймача випромінювання є однією з необхідних умов щодо досягнення малих втрат у разі їх з'єднання [7].

1.3 Основні типи втрат в оптичному волокні

Із самого початку треба зазначити, що втрати і спотворення в будь якій лінії зв'язку, у тому числі і оптичній будуть завжди. Від них повністю позбутися неможливо, тому потрібно вжити заходи щодо здійснення їх мінімізації за рахунок постійного контролю і проведення вимірів основних параметрів. Загалом повні втрати в оптичній лінії можна оцінити для потрібної λ як відношення потужності двох сигналів: того, що був переданий по лінії зв'язку, і того, що був введений з неї. Ці втрати є прямо пропорційними довжині ОВ та вимірюються в [дБ/км]. Це дозволяє отримати характеристику безпосередньо ВОК, а не якоїсь конкретної довжини лінії, тобто іншими словами дає можливість здійснити порівняння за «швидкістю» втрати сигналу, наприклад, 1 км реального ВОК із його можливою довжиною, наприклад, в 10 км при однакових інших умовах експлуатації. Зокрема, наприклад, втрати 0,2 дБ/км у ОВ говорять про те, що у разі проходження 1-го кілометра цього волокна оптичний сигнал втратить 0,2 дБ своєї потужності [4, 5].

Для появи різних типів втрат у ОВ причин є багато і тому потрібно мати розуміння про їх характер і місце в оптичній лінії, де вони виникають (рис. 1.7) [1, 5].

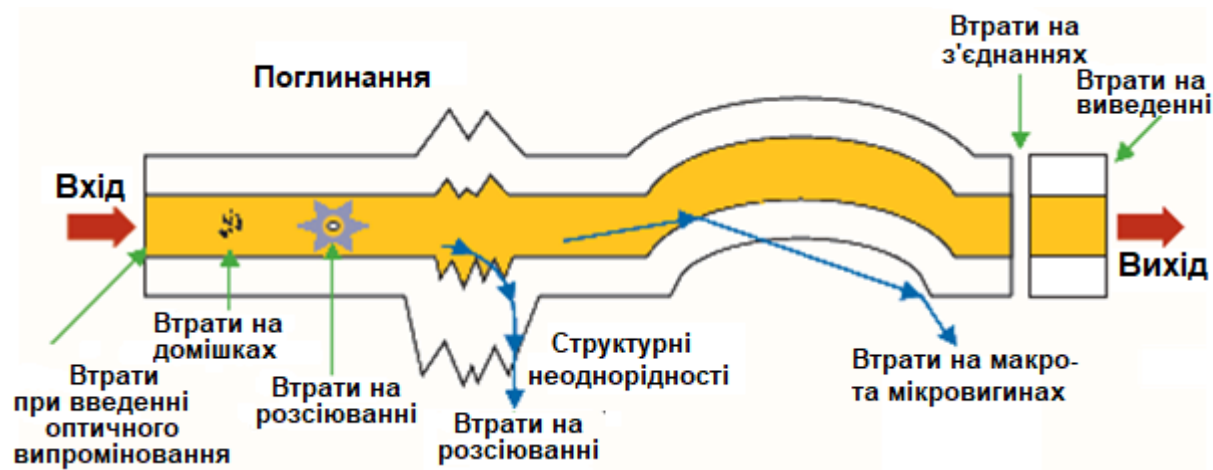


Рисунок 1.7 – Основні типи втрат у оптичному волокні

Як можна бачити із рисунку 1.7, для оцінки повних втрат треба враховувати такі основні з них [1, 4, 5]:

- загасання оптичного сигналу в світловоді, що виникають за рахунок явищ, що є пов'язаними із розсіюванням та поглинанням випромінювання;
- втрати, що виникають на вигинах ОВ;

- втрати, що виникають у місцях зварних з'єднань;
- втрати, що виникають на роз'ємних з'єднаннях;
- втрати, що вносяться пасивними компонентами оптичної лінії (сплітери, фільтри, мультиплексори, атенюатори, тощо).

Раніше було зазначено, що ОВ на цей час є найефективнішим середовищем для передачі сигналів, що переносять різноманітні інформаційні потоки. Однак у кварцовому склі, що є основним матеріалом для виготовлення серцевини ОВ, завжди будуть присутніми різні неоднорідності та домішки, які призводять до часткової втрати енергії світла, яке передається по волокну за рахунок ефектів розсіювання та поглинання. Розподіл цих неоднорідностей і домішок уздовж довжини волокна можна вважати рівномірним, що призводить до рівномірного ослаблення енергії світла по мірі його просування по волокну. Але при цьому треба мати на увазі, що із збільшенням λ оптичного випромінювання властивість волокна розсіювати світло зменшується [5, 7].

У разі розсіюванні світла у світловоді оптичні промені розходяться в різних неконтрольованих напрямках. Частина з них має менший кут φ_1 , чим кут φ_c , тому одні промені витікають із серцевини у оболонку, а інші поширюються у зворотному напрямку до джерела випромінювання, залишаючись при цьому в серцевині (рис. 1,8). Таке розсіювання є присутнім у будь-якому ОВ і отримало назву Релеєвського розсіювання [7].

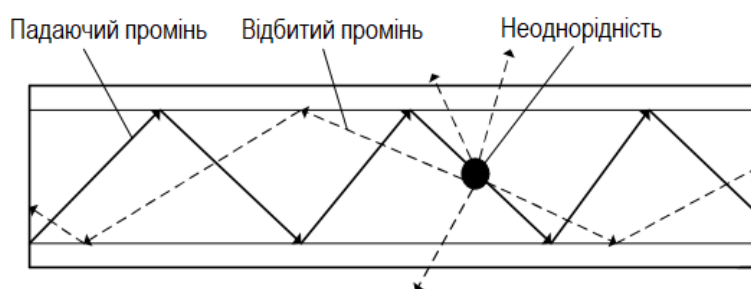


Рисунок 1.8 – Ефект розсіювання світла у ОВ на неоднорідності

Починаючи з певних λ , що є більшими за 1300 нм в оптичному волокні виникає ще одна причина загасання, що пов'язана із поглинанням світла в інфрачервоній області, яке призводить до перетворення оптичної енергії в теплову, а цей процес також викликає втрати. Із подальшим збільшенням λ до 1600 нм вище поглинання стає настільки значним, що звичайне кварцове скло стає непрозорим через ріст втрат [5, 7].

В результаті впливу цих двох ефектів загальні втрати складаються. Мінімальні втрати через загасання досягаються у світловодах, що працюють у третьому вікні прозорості на $\lambda = 1550$ нм. На цей час на цій довжині хвилі стандартним значенням загасання є $\alpha = 0,19 - 0,22$ дБ/км (для SMF), але тут треба зважувати також і на марку виробника ОВ [1, 5].

Ще однією причиною втрат є наявність вигинів ОВ, які утворюються при його прокладанні. Це поширена проблема реальних оптичних ліній зв'язку, що призводить до ослаблення сигналу. Вигини поділяються на два основних типи: мікро- і макровигини.

Мікровигини являють собою невеликі, частіше за все, випадкові відхилення серцевини ОВ від осі. Розмах таких відхилень становить менше 1 мкм, а довжина становить менше міліметра (рис. 1.9) [7].



Рисунок 1.9 – Виникнення втрат у ОВ через мікровигини

Вони можуть виникати через виробничі дефекти, механічні пошкодження при прокладанні ВОК, а також під впливом зовнішніх факторів, таких як температура, вологість або тиск, вже під час експлуатації. Мікровигини присутні по всій довжині волокна і практично не піддаються контролю. Втрати на мікровигини в MMF не залежать від λ і призводять до переходу частини енергії з одних мод на інші. В волокнах SMF втрати через мікровигини залежать від λ . Їх вплив у MMF і SMF на загальні втрати сигналу не є значним, однак вони істотно збільшуються у разі механічних впливів на ВОК [5, 7].

Макровигини, в свою чергу, являють собою вигин ОВ з радіусом більше 2 мм. Значення втрат сигналу безпосередньо залежить від ступеня вигину: чим він сильніший, тим є більшими втрати. Основними причинами макровигинів є зміни у геометрії розповсюдження оптичного променя при здійсненні прокладання кабелю, а також помилки, яких припускаються у разі здійснення монтажних робіт

кросових компонентів або муфт. Розглянемо фізичний механізм появи таких втрат на прикладі волокна зі східчастим профілем показника заломлення (рис. 1.10) [5, 7].

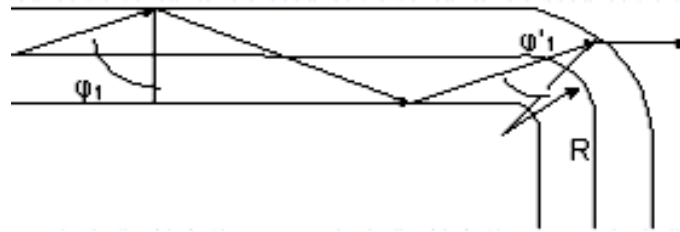


Рисунок 1.10 – Механізм виникнення втрат через макровигини у ОВ

Із наведеного вище рисунка можна бачити, що на вигині ВОК оптичний промінь утворить кут падіння $\varphi'_1 < \varphi_1$, а отже, порушується умова повного внутрішнього відбиття, тобто $\varphi'_1 < \varphi_c$. Такий оптичний промінь зазнає заломлення і далі може перейти в оболонку або витече в навколишній простір в залежності від умов, що були показані на рисунку 1.5. Важливо зазначити, що втрати, які викликані макровигинами, залежать від довжини хвилі сигналу: чим вона більше, тим є вищими втрати [5, 7].

Втрати на зварних з'єднаннях найчастіше проявляються внаслідок невідповідності вісей серцевин ОВ, що зрощуються. Це може бути обумовлено порушенням геометрії поперечного перерізу оптичних волокон. Тут якість зварних з'єднань багато в чому визначається можливостями зварювального обладнання. Зокрема, слід звернути увагу на наявні в ньому технології юстування волокон перед зварюванням, а також здатність комп'ютера, що здійснює управління зварювальним апаратом, точно визначати співвісність серцевин ОВ. Юстування та оцінка значення втрат у точці з'єднання ОВ здійснюються по зміщенню серцевин світловодів, що дозволяє створювати зварні з'єднання із середніми значеннями втрат близько $\alpha = 0,02$ дБ. Взагалі, якісним вважається з'єднання, якщо втрати не перевищують $\alpha = 0,05$ дБ на $\lambda = 1550$ нм. Тобто можна прийняти, що в ідеальних умовах ОВ можна зварити практично без втрат, але в реальних умовах далеко не завжди є змога дотриматися всіх вимог. Це і призводить до виникнення різних порушень якості таких з'єднань. На рис. 1.11 показані характерні відхилення зварних з'єднань приблизно так, як вони відображаються на дисплеї зварювального апарату [5, 13].

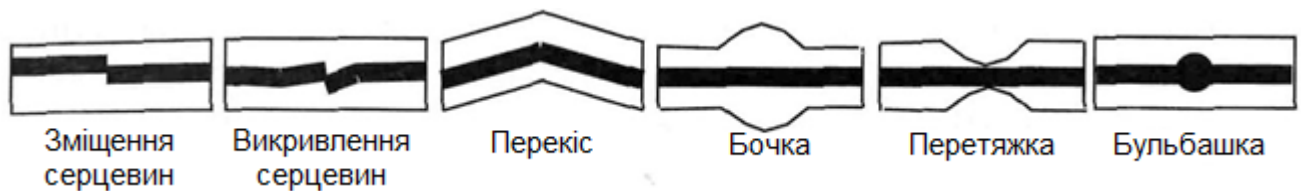


Рисунок 1.11 – Типи дефектів зварених з'єднань ОВ на дисплеї зварювального апарату

Також необхідно врахувати те, що різні марки ОВ можуть мати різні діаметри сердцевин і допуски на ступінь відхилення від окружності, що вимагає від апарату здатності ефективно працювати з цими варіаціями. В даному випадку необхідно суворо дотримуватися всіх вимог до підготовки ОВ до зварювання для запобігання виникненню додаткових дефектів, зокрема застосовувати високоякісний сколювач (середнє значення кута сколювання торця ОВ має бути $0,5^\circ$), а також ретельно очищати поверхні ОВ, що зварюються. Будь-яке відхилення від норми, навіть без проведення подальших вимірювань, свідчить про неякісне зварне з'єднання. Крім того, важливо пам'ятати, що втрати на стиках необхідно оцінювати тільки при проведенні вимірювань з обох сторін [5, 13].

Втрати на роз'ємних з'єднаннях оптичних волокон значно перевищують втрати на зварних з'єднаннях. Це обумовлено наявністю невеликого повітряного зазору між поверхнями відповідних роз'ємів (рис. 1.7). Допустимий рівень втрат на з'єднаннях такого виду становить близько 0,5 дБ. При цьому слід враховувати, що зазначена величина є сумарною і складається з втрат, що вносяться двома роз'ємами, проте точно визначити внесок кожного з них в сумарне значення важко. Контроль величини втрат на роз'ємах оптичних шнурів здійснюється в процесі їх виготовлення, однак практичний досвід показує, що не завжди вдається досягти бажаних результатів, оскільки їх серійне виробництво передбачає вибірковий контроль. У зв'язку з цим для підключення вимірювальних пристроїв до оптичної лінії, що треба протестувати, рекомендується використовувати прецизійні оптичні шнури, які проходять індивідуальний сертифікований контроль на більш сувору відповідність висунутим до них вимогам [1, 5].

Всі перераховані типи втрат в ОВ є складовими сумарних повних втрат у ВОЛЗ і можуть надати уявлення про майбутні якісні показники оптичної лінії зв'язку ще на етапі її проектування. Маючи інформацію про склад обладнання лінії, що проектується, про тип і марку ВОК, який планується до використання,

про його будівельні довжини, кількість зварних з'єднань волокна і кількість роз'ємних з'єднань в лінії, можна, наприклад, провести оцінку її оптичного бюджету [4, 5].

1.4 Пристрої для проведення вимірювань втрат у ОВ

Для здійснення моніторингу якісних показників ОВ в оптичних лініях зв'язку шляхом вимірювання в них втрат використовується два основних типи вимірювальних пристроїв: оптичні тестери (Optical Loss Test Set, OLTS), що дозволяють вимірювати повні втрати в лінії, і оптичні рефлектометри, серед яких найбільш поширеними є OTDR. Рефлектометрами, як зазначалося у вступі, можна проводити комплексний аналіз розподілу втрат уздовж лінії. Відмінною особливістю їх застосування є те, що у разі використання OLTS необхідно використовувати два таких пристрої і підключатися до обох кінців оптичної лінії, а у разі проведення вимірювань OTDR його потрібно підключати до оптичної лінії тільки на одному кінці. При цьому також реалізуються різні підходи до вимірювання втрат [5].

Зокрема OLTS в загальному випадку являє собою комплект з 2-х пристроїв: джерела і вимірювача оптичної потужності, та реалізує два основні підходи до вимірювання втрат відповідно до рекомендацій ІТУ-Т G.651 і G.652. Ці підходи базуються на методах зламу волокна і внесених втрат [14].

У підході, що ґрунтується на методі облому ОВ, вимірюється потужність P_1 [дБм], яка пройшла через всю довжину волокна. Потім волокно ламається приблизно на відстані 2 м від точки введення випромінювання (рис. 1.12) і здійснюється вимірювання потужності P_2 [дБм], яка пройшла через короткий фрагмент ОВ, що залишився. Величина втрат тут буде визначена як різниця потужностей: α [дБ] = $P_1 - P_2$. Цей підхід забезпечує досить високу точність проведення вимірювань, оскільки відсоток потужності, що вводиться в ОВ, залишається постійним. Однак можна виділити і недолік, який полягає в порушенні цілісності світловоду, тому є неможливим застосування даного підходу під час прокладання оптичної лінії [14].

Тому на практиці найчастіше використовується метод внесених втрат (рис. 1.13). Тут спочатку робиться вимірювання опорної потужності P_1 [дБм]. Після цього між джерелом випромінювання і вимірювачем потужності включають ОВ (або лінію зв'язку), що тестується, і проводиться вимірювання потужності P_2 [дБм], що пройшла через нього. Величина втрат, як і в попередньому випадку, визначається як різниця потужностей: α [дБ] = $P_1 - P_2$ [14].

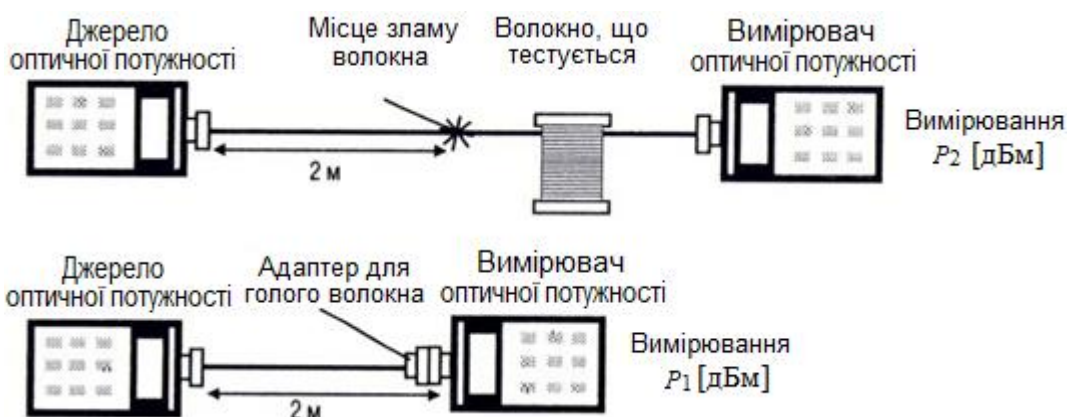


Рисунок 1.12 – Проведення вимірювання втрат у ОВ із застосування методу зламу волокна

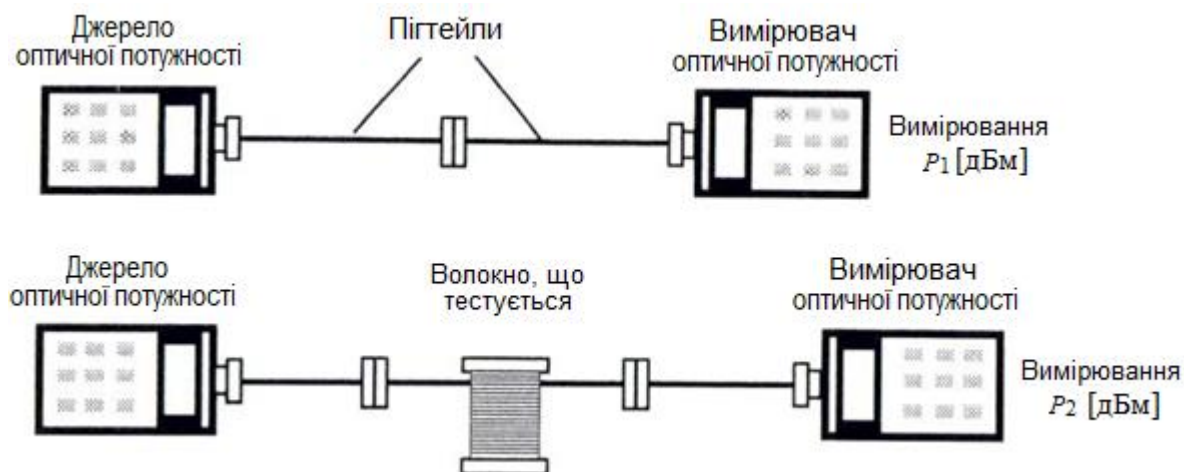


Рисунок 1.13 – Проведення вимірювання втрат у ОВ із застосування методу внесення втрат

Цей підхід широко застосовується при проведенні вимірів сумарних втрат у реальних ВОЛЗ. Оскільки кінці реальних оптичних ліній зазвичай знаходяться на

значній відстані один від одного, то потрібне здійснення додаткового калібрування лазерного джерела і фотоприймального модуля. Фотоприймальний модуль OLTS в точці А використовується для вимірювання опорного рівня потужності, а аналогічний блок OLTS в точці Б – для вимірювання потужності випромінювання, що пройшло через оптичну лінію [14].

Процедура проведення таких вимірювань включає наступні етапи: спочатку вхід і вихід OLTS в деякій точці А з'єднуються оптичним шнуром і робиться вимірювання величини опорного оптичного сигналу. Потім шнур відключається від фотоприймального блоку і підключається на вході оптичної лінії. У точці Б OLTS підключається до виходу оптичної лінії і проводяться вимірювання величини оптичного сигналу. Отримані результати вимірювань передаються (наприклад, по оптичному телефону) в точку А. Значення втрат обчислюється як різниця між опорним і вимірним сигналами з урахуванням попередньої звірки показань фотоприймальних модулів [14].

При такій процедурі проведення вимірювань можливі відхилення, які обумовлені нестабільністю джерела випромінювання, нелінійністю шкали вимірювання, розбіжностями в чутливості фотоприймальних модулів і відхиленнями величини втрат в роз'ємах від їх номінальних значень. Для зниження таких відхилень вимірювання втрат в оптичній лінії зазвичай проводять в обох напрямках [14].

Проведення вимірювань OTDR здійснюється шляхом надсилання в ОВ тестових зондуючих імпульсів, на які в зворотному напрямку приходять відгук, що ґрунтується на зворотному розсіюванні в ОВ. Аналізуючи цей відгук, процесор OTDR визначає, скільки оптичної потужності втрачає сигнал у кожній точці волокна. Розглянемо модель OTDR з точки зору фізики процесу вимірювань, яка узагальнено наведена на рис. 1.14 [5, 6].

Оптичний зондуючий імпульс тривалістю τW (що відповідає його ширині W) вводиться у волокно, яке потрібно протестувати. У момент часу t_0 передній фронт імпульсу досягає положення волокна z_m , генеруючи Релеївське розсіяне світло R_{z_m} . При поверненні R_{z_m} на вхід у волокно, що тестується, воно комбінується з Релеївськими розсіяними сигналами, що були згенеровані збудженням імпульсу на інших ділянках ОВ, і знову вже разом повертаються на вхід волокна, що тестується [6].

Наприклад, у момент часу $t_0 + \tau W/4$, R_{z_m} досягає ділянки волокна z_p , де імпульс, що поширюється, одночасно генерує зворотно-розсіяне Релеївське світло R_{z_p} . Ці два розсіяні оптичні сигнали (R_{z_m} та R_{z_p}) далі разом поширюються назад у напрямку системи реєстрації. Аналогічно, коли настає момент часу $t_0 + \tau W/2$, і R_{z_m} , і R_{z_p} ділянки волокна z_n , де задній фронт імпульсу збуджує додаткове зворотно-розсіяне Релеївське світло. Це новостворене розсіяне світло комбінується з існуючими сигналами R_{z_m} , і R_{z_p} , утворюючи сумарний сигнал, що розповсюджується у зворотному напрямку [6].

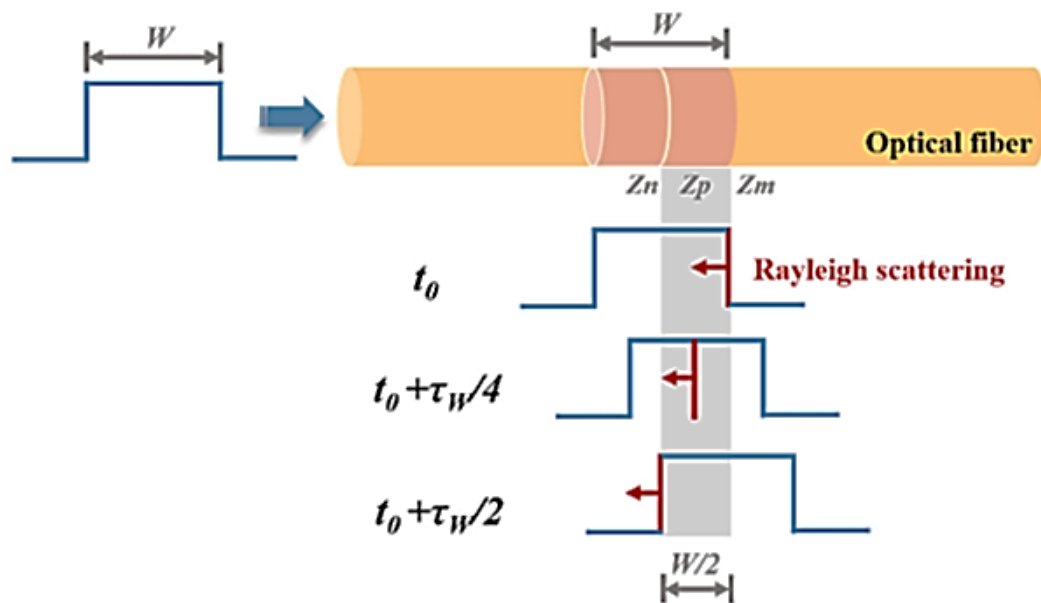


Рисунок 1.14 – Фізична модель процесу вимірювань OTDR

По мірі розповсюдження зондуючого імпульсу далі за межі z_m , новоутворене розсіяне світло перестає перекриватися з R_{z_m} . Як наслідок, виявлений сигнал зворотного розсіювання в кінцевому підсумку складається тільки з тих сигналів, які утворилися між положеннями z_n і z_m у ОВ. Це демонструє, що Релеївське розсіяне світло, яке прийняте системою реєстрації в момент досягнення імпульсом позиції z_m , надходить не лише від z_m , а є результатом суперпозиції всього зворотного-розсіяного світла утвореного в просторовому інтервалі, який відповідає половині ширини імпульсу ($W/2$) [6].

Те, що зворотно-розсіяні сигнали, які згенеровані в різні моменти часу, можуть поєднуватися в одній точці, пояснюється тим, що вхідний імпульс має певну просторову ширину, і зворотно-розсіяні сигнали, що утворені переднім і заднім фронтами імпульсу в різні моменти, сходяться в процесі свого розповсюдження [6].

Вищезазначений аналіз показує, що коли зондуєчий імпульс з просторовою шириною W вводиться в оптичне волокно, то лише Релеївське зворотно-розсіяне світло, що згенероване в діапазоні $W/2$, може зустрітися одне з одним та одночасно досягти початкової точки волокна. Цей діапазон називається ефективною зоною розсіювання, яка визначає просторову роздільну здатність OTDR [6].

Такий підхід до вимірювання втрат є непрямим і він має похибки, в результаті чого у визначенні повних втрат у ВОЛЗ виникають деякі припущення.

Таким чином, за точністю проведення вимірювань, можна сказати, що OLTS є кращими ніж OTDR. Слід також додати, що використовуючи OLTS можна проводити вимірювання втрат у ВОЛЗ будь-якої протяжності (навіть, якщо, умовно кажучи, її довжина становить 0 м), а використовуючи OTDR неможливо виміряти втрати в коротких лініях, навіть, якщо їх довжина буде становити кілька метрів (наприклад, оптичні шнури). З вищевикладеного можна бачити, що використовуючи OLTS можна проводити вимірювання повних втрат, як у ВОЛЗ, так і в коротких оптичних шнурах. OTDR можна використовувати для перевірки якості світловодів ВОК на транспортувальному барабані (тобто проводити вхідний контроль), проводити оцінку якості зварних з'єднань волокон, проводити наближені вимірювання повних втрат у ВОЛЗ, а також здійснювати пошук і локалізацію пошкоджень оптичних волокон на лінії [5].

2 КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ, ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ОПТИЧНИХ РЕФЛЕКТОМЕТРІВ

2.1 Функціональна схема OTDR

Імпульсні оптичні рефлектометри (OTDR), що вже неодноразово були згадані вище, є найбільш поширеним типом оптичних рефлектометрів. Тому далі на їх прикладі розглянемо базові конструктивні особливості та принцип роботи. Функціональна схема OTDR наведена на рис. 2.1 [5, 6].

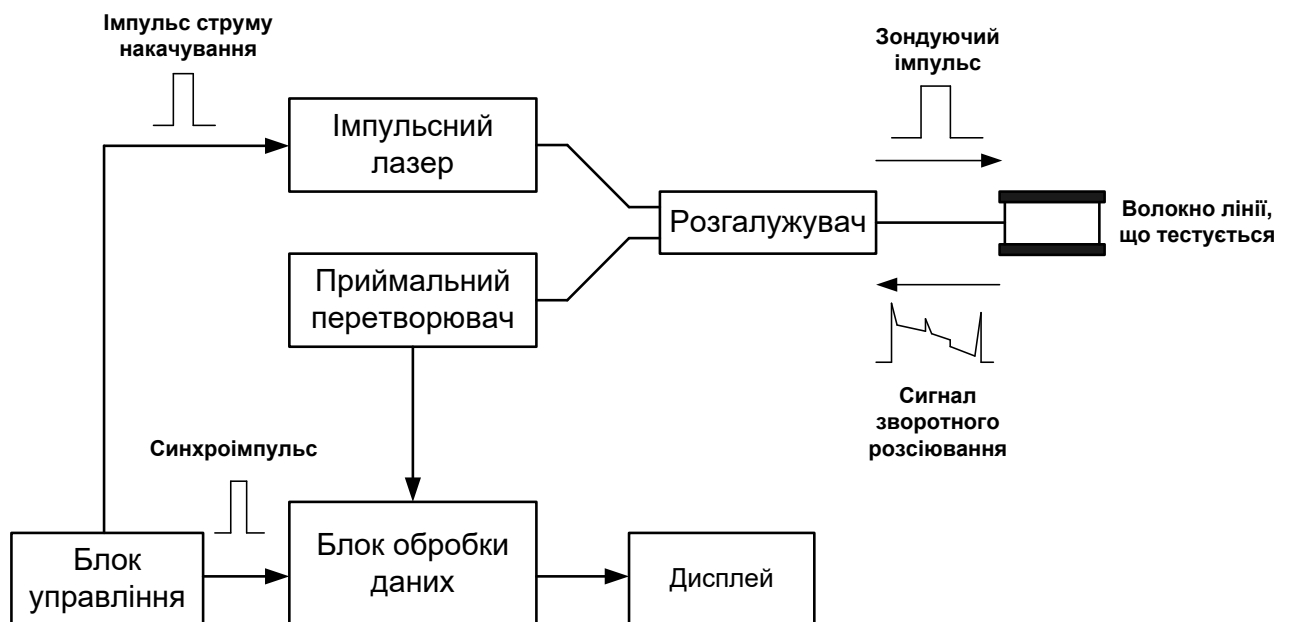


Рисунок 2.1 – Функціональна схема OTDR

В різних моделях рефлектометрів для генерації зонduючих імпульсів (див. рис. 1.14) найчастіше використовуються напівпровідникові лазери, які функціонують за рахунок прямої модуляції струмом накачування. Вони генерують світлові імпульси з постійною потужністю, але їх тривалість може змінюватися при постійному струмі накачування. Тривалість імпульсів, що генеруються, визначається значенням тривалості імпульсу струму накачування, який генерує блок управління рефлектометра. Найпоширеніші лазери цього типу створюють імпульси тривалістю від 1 нс до 10 мкс. Частота цих імпульсів може бути встановлена або вручну, або автоматично – залежно від довжини ділянки

ВОК, що тестується. Одночасно з імпульсами струму накачування до блоку обробки даних з блоку управління надходять синхронізуючі імпульси [5, 6].

Приймальний перетворювач призначений для приймання оптичних сигналів зворотного розсіювання та їх перетворення в електричний струм. Його основними складовими компонентами є фотоприймач та попередній підсилювач. Основними вимогами до приймального перетворювача є висока чутливість, низький рівень власних шумів і широка смуга пропускання. Також, крім вищезазначеного, цей функціональний модуль рефлектометра має забезпечувати максимально можливу лінійність перетворення в широкому динамічному діапазоні потужностей оптичного сигналу [5, 6].

Блок обробки даних являє собою обчислювальну мікропроцесорну систему рефлектометра. Він здійснює обробку електричного сигналу, що надходить від приймального перетворювача, та відображає результат у вигляді рефлектограми на екрані. Цей блок також виконує всі автоматичні функції аналізу рефлектограм та проведення вимірювань [5, 6].

Зондуєчий оптичний імпульс подається у ВОК, що тестується через спеціальний пристрій – розгалужувач. Він має два входні робочі порти та один вихідний порт, як це зображено на рис. 2.2 [6].

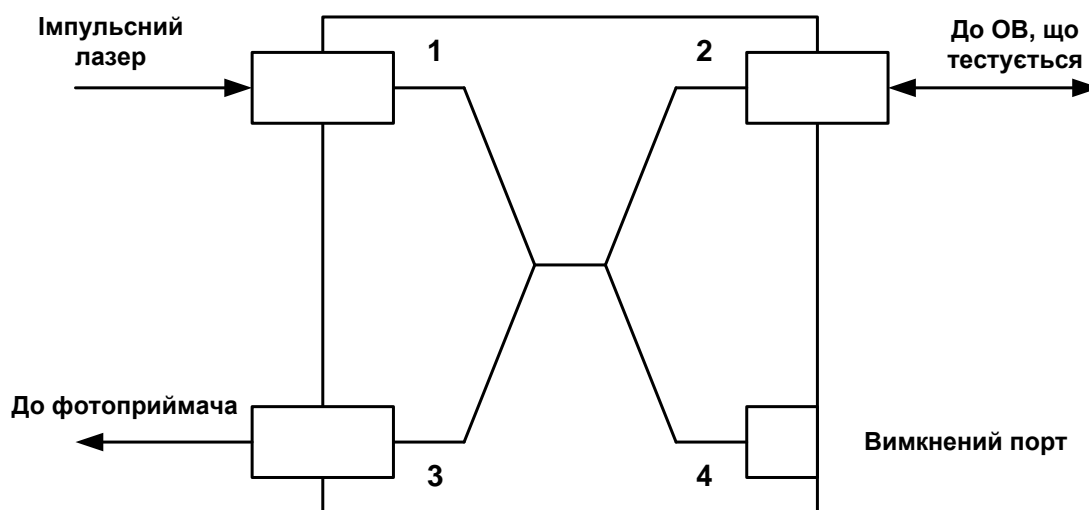


Рисунок 2.2 – Схема функціонування оптичного розгалужувача

Розгалужувач виконує розділення зондуєчих імпульсів, що вводяться у ОБ, та сигналів зворотного розсіювання, які надходять до високочутливого фотоприймача. Як правило, розгалужувача являє собою пристрій, що

побудований на основі чотириполюсника та який має два вхідні порти (1, 2) та двома вихідні порти (3, 4), з яких, як показано на рисунку 1.2, використовуються лише три (1, 2, 3) [15].

До портів (1, 2) підключаються імпульсний лазерний випромінювач і приймальний перетворювач, тоді як робочий вихідний порт (3) має з'єднання з ділянкою ВОК, що буде тестуватися. Невикористовуваний 4-й порт розгалужувача підлягає обов'язковому заглушенню за допомогою спеціального поглинального компонента, який запобігає виникненню відбиттів. Через цей же розгалужувач сигнал зворотного розсіювання від ОВ, що тестується, надходить через порти 2 та 3 на фотоприймач приймального перетворювача [15].

2.2 Принцип роботи OTDR

Принцип роботи оптичного рефлектометра ґрунтується на аналізі відбитих оптичних імпульсів. Вимірювання характеристик ОВ за допомогою OTDR базується на явищі зворотного розсіювання світла у волокні та відбиття оптичного сигналу в точках, де спостерігаються різкі зміни показника заломлення [5, 6, 15].

Оптичні імпульси, що вводяться в ОВ, що тестується, мають достатньо високу потужність, яка поступово зменшується в процесі поширення по світловоду відповідно до його коефіцієнта загасання. Деяка частина оптичної енергії розсіюється, а основний відбитий оптичний сигнал надходить у приймальний перетворювач і перетворюється в електричний струм, величина якого є прямо пропорційною потужності оптичного сигналу [15].

Проведення вимірювань загасання з використанням OTDR ґрунтується на припущенні, що коефіцієнт зворотного розсіювання є сталою величиною для ОВ, що тестується, тобто в кожній його точці назад відбувається розсіювання однакової частини оптичної потужності. Тому загасання в самому ОВ проявляється у лінійному зменшенні потужності відбитого сигналу на вході фотоприймача, а його величина на ділянці ОВ між деякими точками А та Б визначається як половина різниці між відповідними рівнями потужності P_A та P_B :

$$\alpha = -0,5 \cdot (P_A - P_B), \text{ дБ.} \quad (2.1)$$

Наявність множника $-0,5$ ґрунтується на тому, що оптичний сигнал вимушений проходити подвійну відстань: від джерела, де відбувається його введення в ОВ до точки відбиття і у зворотному напрямі [16, 17].

У місцях можливих дефектів або на стиках ОВ значно збільшується зворотне випромінювання. Розрахунок відстані до такої критичної точки, де є дефект, стик або обрив ОВ робиться за допомогою обчислення часу зворотного випромінювання [17].

Складовою блоку обробки даних є схема вимірювання часових затримок, яка теж відноситься до основних елементів OTDR. Відстань до ділянки ОВ, що тестується, є результатом обчислення часової затримки, що виміряна, та яка на цій ділянці відповідає розсіяному або відбитому оптичному сигналу.

Очевидно, що на точність проведення вимірів часових затримок безпосередньо впливає просторова точність вимірювань, тому, з метою отримання правильного значення відстані у разі здійснення вимірювання OTDR, необхідно точно визначити значення показника заломлення. Це ґрунтується на тому, що відстань дорівнює добутку часу проходження оптичного сигналу по ВОК на групову швидкість, яка є обернено пропорційною значенню показника заломлення ОВ [18].

Також у складу блоку обробки сучасних OTDR входить аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і модуль здійснення цифрової обробки, що реалізується на основі спеціалізованого мікропроцесора. З метою зниження впливу шумів і, отже, розширення динамічного діапазону при збереженні просторової роздільної здатності, у блоці цифрової обробки проводиться накопичення даних від великої кількості відбитих сигналів. За рахунок цього досягається зниження рівня шуму до величини, що є пропорційного квадратному кореню від кількості відбитих сигналів. Далі він на основі цих накопичених даних формує рефлектограму, яка зразу виводиться на дисплей OTDR, або в спеціальних блоках автоматичної обробки здійснюється її обробка і на дисплей виводяться вже отримані результати цієї обробки. Сама рефлектограма надалі може зберігатися в пам'яті OTDR і, у разі необхідності, її можна порівняти з іншими рефлектограмами, що зберігаються в пам'яті пристрою [5, 19].

2.3 Склад і підходи до аналізу типової рефлектограми

Як було показано вище, розсіяні у волокні імпульси світла повертаються у OTDR і через приймальний перетворювач поступають на фотоприймач, де вони перетворюються на електричний сигнал. Цей оптичний сигнал, в залежності від зроблених налаштувань приладу, накопичується і далі обробляється програмним забезпеченням. Результатом цієї обробки буде деяка залежність рівня потужності оптичного сигналу від часу, але для зручності шкала часу конвертується в шкалу відстаней і на екран дисплея OTDR виводиться результуюча крива, яка і отримала назву рефлектограми. В цілому вона характеризує рівень зворотного розсіювання в кожній точці оптичного волокна. Вигляд окремих складових рефлектограми відповідає структурі оптичної лінії, на якій проводяться вимірювання. Ці складові мають свій характерний вигляд на дисплеї рефлектометра. Подання інформації у такому вигляді дозволяє робити аналіз рефлектограми як візуально, так і автоматично із застосуванням програмних алгоритмів, що вбудовані у OTDR. Загальний вигляд рефлектограми показано на рис. 2.3 [5, 19].

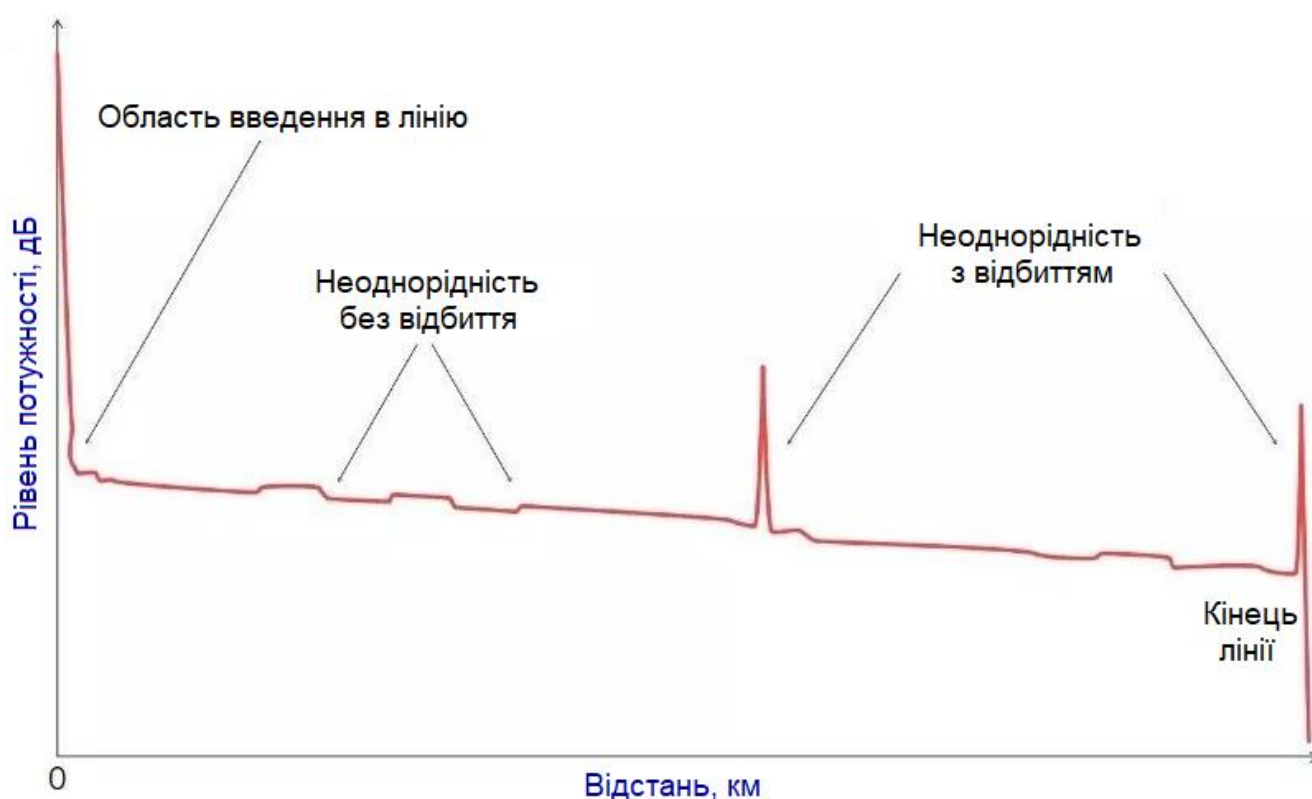


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд рефлектограми

Зокрема рефлектограма на рисунку 2.3 містить кілька типових ділянок, що відповідають різним неоднорідностям, які можуть бути у волокні. Ці неоднорідності у рефлектометрії прийнято називати подіями. Щоб отримати величини тих чи інших втрат, що виникають на різних ділянках оптичної лінії, необхідно насамперед провести правильну інтерпретацію всіх подій, які можна побачити на рефлектограмі. Зокрема до основних типів подій можна віднести наступні [5]:

- сплеск рівня зворотного сигналу на вході в лінію, що обумовлений відбиттям від вхідного роз'єму, за допомогою якого OTDR до неї підключається;

- пологі лінійні ділянки, що розташовані між неоднорідностями, та які відповідають ділянкам цілого ОВ. В них зміна рівня зворотного оптичного сигналу обумовлена рівномірним загасанням за рахунок ефектів Релеївського розсіювання і поглинання. Кут нахилу таких ділянок є прямо пропорційним значенню величини кілометричного загасання;

- події без відбиття відображаються на рефлектограмі у вигляді «сходинок», що показують зміни рівня зворотного оптичного сигналу. Ці події є властивими для зварних з'єднань і вигинів;

- події з відбиттям відображаються на рефлектограмі у вигляді різких сплесків рівнів потужності. Вони є властивими для роз'ємних з'єднань, мікротріщин, торців волокон;

- зміна рівня різного виду зворотного сигналу, але з подальшим обов'язковим спадом до рівня шумів, що є характерним для кінця оптичної лінії. Різний вид обумовлений різним станом кінця лінії. Наприклад, типом роз'єму (UPC/APC) або його відсутністю (зокрема, злам волокна, який робиться при монтажі роз'єму, може відбивати або повністю розсіювати світло).

Для проведення вимірювань за допомогою рефлектометра треба розташувати його фотоприймач поблизу того ж самого кінця ОВ, через який буде уводитися зондуєчий оптичний імпульс. Це дозволяє здійснювати реєстрацію тільки тієї частини розсіяного (відбитого) випромінювання, яка поширюється вздовж ОВ по його середині. При цьому аналіз часової залежності прийнятого оптичного випромінювання дозволяє провести розрахунки параметрів як самого світловоду, так і ВОЛЗ в цілому [14, 19].

Рефлектометр дозволяє визначити потужність зондуєчого сигналу в деякій області волокна, при відомому коефіцієнті розсіювання світла в цій області. А при

невідомій величині коефіцієнта зворотного розсіювання, але якщо ця величина однакова на певних ділянках оптичної лінії, за допомогою OTDR можна отримати відношення потужностей оптичного сигналу на цих ділянках, а також і відповідну величину загасання між цими ділянками [14].

2.4 Основні технічні параметри оптичного рефлектометра

У разі необхідності застосування OTDR, важливо знати його основні технічні параметри, на які треба звертати увагу, починаючи із стадії вибору пристрою. Треба зазначити, що технічні параметри оптичного рефлектометра також залежать і від характеристик конкретної ділянки оптичної лінії, ВОК або окремого ОВ, що тестуються. Зокрема, якщо проводити виміри різних ОВ одним і тим же OTDR, то максимальна довжина ділянки волокна, що тестується, буде визначатиметься коефіцієнтом загасання світла у ньому.

Також треба звернути увагу, що технічні параметри OTDR, що визначені в стандартних умовах експлуатації, частіше за все, не мають зв'язку з параметрами конкретної ВОЛЗ чи конкретного ОВ, що тестуються, а залежать тільки від можливостей рефлектометра. За технічними параметрами конкретної моделі OTDR можна визначити можливий діапазон її застосування і врахувати необхідну точність вимірювань для конкретних умов.

Таким чином можна виділити наступні основні технічні характеристики оптичного рефлектометра.

1) Тривалість імпульсів.

Вона прямим чином визначає, наскільки сильним буде відбитий сигнал і наскільки великими будуть ділянки ОВ, які рефлектометр не в змозі виявити (так звані «мертві зони»). Більш довгі імпульси використовуються для оперативного пошуку обривів або пошкоджень у світловоді. Імпульси меншої тривалості використовуються для виявлення дрібних дефектів або неоднорідностей, що розташовані між собою поруч. Такі імпульси є оптимальними для проведення вимірювань тих ділянок оптичного волокна, які знаходяться в безпосередній близькості до рефлектометра [20].

2) Робоча довжина хвилі.

Тут слід звернути увагу на певну залежність: чим є більшою довжина хвилі випромінювання, тим меншими будуть втрати від ефекту розсіювання світла, але

тим більшими будуть втрати на вигинах ОВ. Найкращі результати досягаються при проведенні вимірювань на двох різних довжинах хвиль. Крім того, при виконанні вимірювань крім величини λ , також важливий і її розкид (як правило, ширина хвильового діапазону на робочій довжині хвилі). Чим менше цей діапазон, тим вища точність вимірювань, що проводяться рефлектометром [20].

3) Динамічний діапазон.

Цей параметр є одним із найважливіших для OTDR і дуже часто використовується для здійснення класифікації цих пристроїв. Величина динамічного діапазону залежить від налаштувань таких показників, як: тривалість імпульсів, час усереднення сигналу і діапазон довжин ОВ, що вимірюються. За його значенням можна отримати інформацію про максимально допустимий рівень втрат у оптичній лінії, що тестується, а також про тривалість процесу вимірювань, що проводяться за допомогою цього приладу [14].

Згідно до рекомендації Міжнародної електротехнічної комісії (International Electrotechnical Commission, IEC) динамічний діапазон OTDR (D_{dB}) визначається як різниця між рівнем сигналу зворотного релеївського розсіювання на початку рефлектограми і піковим значенням шумів при відсутності оптичного сигналу. Рівень сигналу зворотного релеївського розсіювання визначається за допомогою екстраполяції прямолінійної нахиленої ділянки рефлектограми на її початок (рис. 2.4). Рівень пікового значення шуму встановлюється шляхом врахування умови, що ймовірність потрапляння сигналу шуму в достовірний інтервал має бути не менше 98%. Для цього по верхньому краю шумової доріжки проводиться пряма горизонтальна лінія з таким розрахунком, щоб її перетинав лише один шумовий пік із 100 тих, що спостерігаються (рис. 2.5) [14].

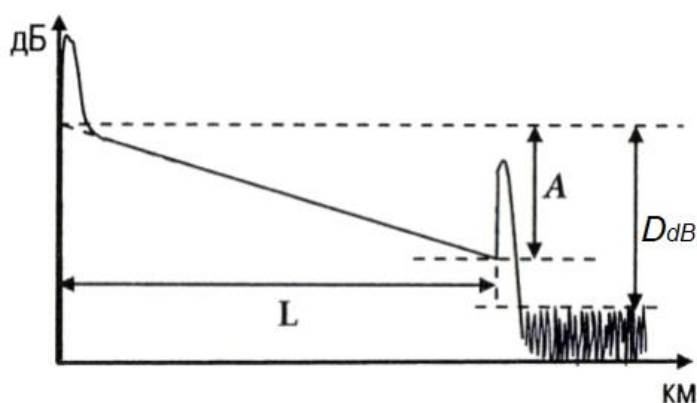


Рисунок 2.4 – Динамічний діапазон рефлектометра

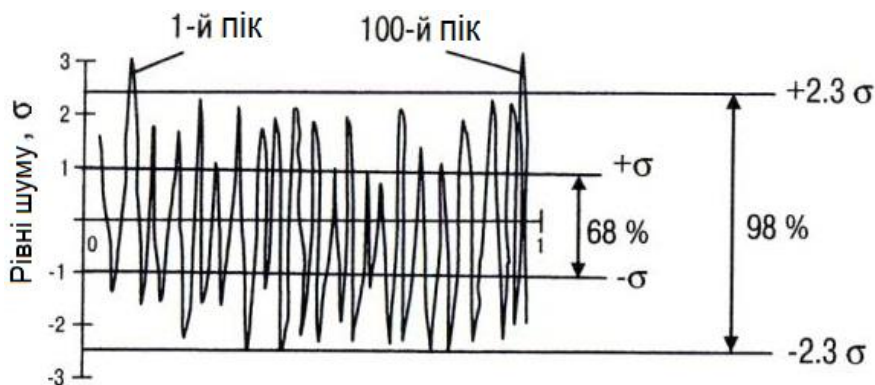


Рисунок 2.5 – Рівні шуму у лінійному масштабі

Фізичний зміст динамічного діапазону OTDR є в тому, що, як видно на рис. 2.4, повні втрати в лінії (α_{dB}) дорівнюють відстані між рівнями сигналу зворотного релеївського розсіювання на початку і в кінці рефлектограми. Причому її кінець буде видно на дисплеї до тих пір, поки сигнал не буде зменшений до рівня шуму. Таким чином, динамічний діапазон OTDR дорівнює максимальній величині повних втрат в оптичній лінії, що вимірюється і виражає максимально можливу довжину ділянки оптичної лінії, на якій проводяться виміри. Її можна визначити за наступною формулою [14]:

$$L = \frac{D_{dB}}{\alpha_{dB}}, \quad (2.2)$$

де D_{dB} – динамічний діапазон OTDR, дБ;

α_{dB} – повні втрати у ОВ, дБ/км.

Величина динамічного діапазону OTDR визначається як різниця між рівнем потужності зворотного розсіювання безпосередньо на самому початку волокна і рівнем шумів при заданому часі проведення вимірювань, відповідно до виразу:

$$D_{dB} = 5 \log P_{SZP} - 5 \log \sigma, \quad (2.3)$$

де P_{SZP} – рівень потужності зворотного розсіювання, дБм;

σ – рівень шумів, дБм.

Слід зазначити, що виробники рефлектометрів вважають за краще визначати величину σ не за її піковим значенням, а за середньоквадратичним

значенням (Root Mean Square, RMS). У цьому випадку величина динамічного діапазону D_{RMS} буде на 1,8 дБ більшою за D_{dB} , тобто за динамічний діапазон, що відповідає рекомендації IEC [14].

Наведемо пояснення, чому рівень середньоквадратичного значення шуму буде знаходитися на 1,8 дБ нижче його пікового значення. Зокрема, будемо вважати, що шум розподілений за нормальним (гаусовим) законом. Тоді, як добре відомо, ймовірність перебування в інтервалах $-2\sigma \dots +2\sigma$ і $-3\sigma \dots +3\sigma$ дорівнює, відповідно, 95 % і 99,7 %, де σ є тотожним RMS шуму. Звідси видно, що ймовірності перебування в 98% відповідає деякий проміжний інтервал $(-2,3\sigma \dots +2,3\sigma)$, або інакше виходить, що в лінійному масштабі середньоквадратичний рівень шуму менше пікового значення шумів в 2,3 рази (рис. 2.5). У логарифмічному масштабі (за шкалою рефлектометра це $5\log$) в 2,3 рази менша величина є зміщеною вниз на 1,8 дБ (оскільки $5\log 2,3 = 1,8$). Звідси і витікає, що середньоквадратичне значення рівня шуму знаходиться на 1,8 дБ нижче його пікового значення [14].

При необхідності проведення порівняння різних моделей OTDR, їх динамічний діапазон є основним параметром, що виступає в якості основного критерію цього процесу. Оскільки величина D_{dB} збільшується зі збільшенням тривалості імпульсів τ і часу усереднення сигналу t , то зазвичай значення D_{dB} вказують при максимальних для OTDR значеннях τ і t . Однак ці показники у різних виробників OTDR можуть відрізнятися. Для того, щоб усунути цю неоднозначність, IEC рекомендує у разі здійснення порівняння D_{dB} оптичних рефлектометрів використовувати показник, $\tau = 10$ мкс, а відповідно показник $t = 3$ хв. У той же час виробники OTDR у своїх специфікаціях максимальне значення динамічного діапазону наводять, як правило, при $\tau = 20$ мкс. Це значення D_{dB} може дорівнювати до 50 дБ. Такі OTDR можна застосовувати для вимірів оптичних ліній, що мають протяжність до 230 км [14, 20].

4) Мертві зони (Dead Zone, DZ).

Цей параметр визначає ширину ділянки ОВ поблизу неоднорідностей, на якій дуже складно або неможливо провести вимірювання. DZ визначаються для неоднорідностей, які, як відбивають, так і не відбивають оптичний сигнал (це так звані мертві зони подій (Event Dead Zone, EDZ), а також за загасанням

(Attenuation Dead Zone, ADZ). Зазначимо, що в специфікаціях на рефлектометр зазвичай вказують тільки ширину EDZ для неоднорідності, що відбиває (EDZ за відбиттям) і по загасанню [14, 13].

Ширину DZ для неоднорідності, що не відбиває, визначають за шириною перехідної ділянки, яку можна спостерігати на рефлектограмі в місці розташування цієї неоднорідності (рис. 2.6). При цьому прийнято вважати, що величина втрат у цій неоднорідності є меншою за 1 дБ [14].

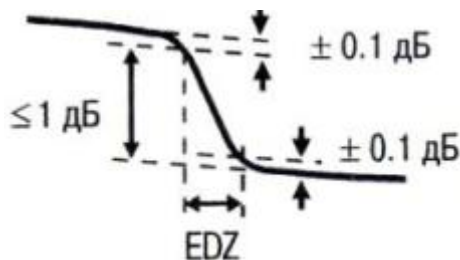


Рисунок 2.6 – Ширина EDZ для невідбиваючої неоднорідності

Ширину DZ за відбиттям приймають рівною ширині сплеску на рефлектограмі (ширині імпульсу світла (на дисплеї рефлектометра)) за так званим половинним рівнем (тобто повна ширина визначається при половині максимального значення (Full-Width at Half-Maximum, FWHM)). За шкалою OTDR цей рівень знаходиться приблизно на 1,5 дБ нижче вершини імпульсу (рис. 2.7). Ширина EDZ вважається рівною ширині сплеску на рефлектограмі внаслідок того, що передній фронт відбитого імпульсу знаходиться там же, де і сама неоднорідність. Задній фронт відбитого імпульсу буде знаходитися далі від початку рефлектограми, тому що він приходить на фотоприймач пізніше, ніж передній фронт. Звідси відстань між переднім і заднім фронтам імпульсу дорівнює ширині імпульсу на дисплеї OTDR [14].

Коли відстань між неоднорідностями буде відчутно більшою за ширину самого імпульсу, то вони будуть легко ідентифікуватися, оскільки відбиті від них імпульси не будуть перекриватися. Тобто, чим меншою буде відстань між неоднорідностями, тим сильніше будуть перекриватися відбиті від них імпульси, і, коли відстань між неоднорідностями стане дорівнювати ширині імпульсу, то відбиті імпульси перекриваються настільки, що зведуться в один з незначним спадом на вершині. Наявність цього спаду говорить про те, що відбиття утворюється від двох неоднорідностей. Воно не є помітним, коли [14]:

- відстань між цими неоднорідностями є меншою за ширину EDZ;
- коефіцієнти відбиття від неоднорідностей будуть відрізнятися один від одного;
- зображення рефлектограми є зашумленим.

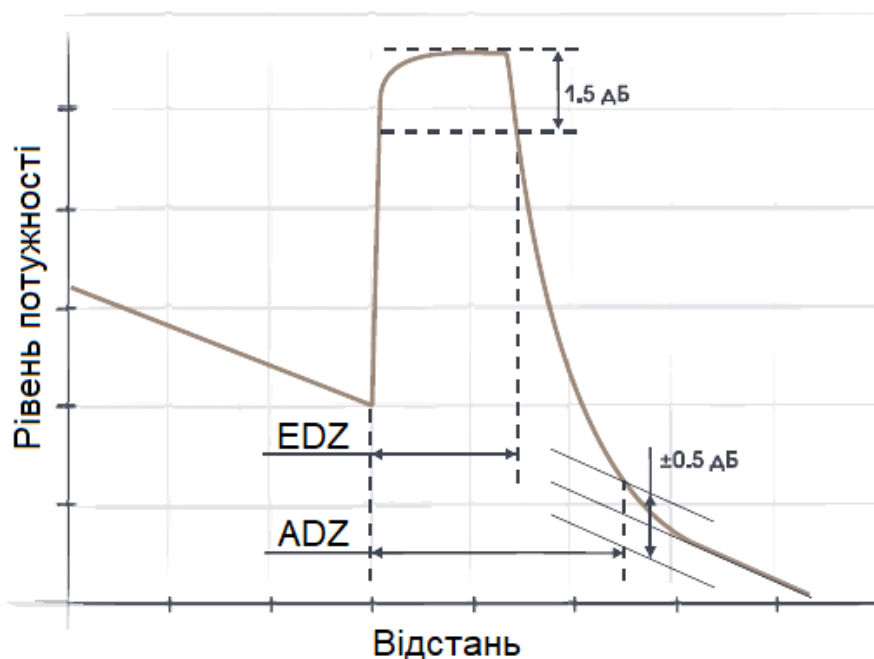


Рисунок 2.7 – Визначення EDZ за відбиттям та ADZ

Ширина DZ за загасанням визначається як мінімальна відстань після відбиття, в межах якої не можна проводити вимірювання втрат в ОВ. Ця відстань буде дорівнювати відстані від переднього фронту імпульсу до кінця його заднього фронту (рис. 2.7). Згідно з рекомендаціями компанії Telecordia (раніше відома під назвою Bellcore), що займається дослідженнями і стандартизацією в сфері телекомунікацій, кінець заднього фронту імпульсу визначається як точка, яка віддалена від лінійної ділянки рефлектограми на 0,5 дБ по вертикальній шкалі (визначеній при коефіцієнті відбиття – 35 дБ) [14].

5) Просторова роздільна здатність (ПРЗ).

Цей технічний параметр OTDR, нарівні з EDZ, визначає здатність рефлектометра розрізнити дві події – розрізнити поглинаючу подію на фоні відбиваючої. Це є відмінністю від особливості визначення DZ, де розгляду приймаються тільки дві відбиваючі події [13].

Поблизу вхідного торця оптичного волокна, що тестується, ПРЗ відображає мінімальну відстань, на якій OTDR може виявити і провести виміри поглинаючої

події, наприклад, протестувати на втрати зварне з'єднання. Зокрема для зварного з'єднання з втратами менше 1 дБ роздільна здатність являє собою на рефлектограмі довжину сходинки між рівнями 10% і 90% її висоти. У випадку наявності відбиваючої події (наприклад, роз'єм) ПРЗ рефлектометра визначається тривалістю піку на рівні у 50% від максимуму, або більш точно – напівшириною цього піку на рівні FWHM [14, 20].

ПРЗ залежить як від тривалості імпульсу, так і від смуги пропускання попереднього підсилювача, що є одним із компонентів приймального перетворювача OTDR (див. рис. 2.1). Вираз, що дозволяє приблизно оцінити величину роздільної здатності поодинокій відбиваючої події має наступний вигляд [14]:

$$\Delta l = \frac{c}{2n} \sqrt{(\Delta t)^2 + \left(\frac{1}{\Delta f}\right)^2}, \quad (2.4)$$

де Δl – мінімальна довжина неоднорідності, що вимірюється;

Δt – тривалість зондуючого імпульсу (часова роздільна здатність);

Δf – ширина смуги попереднього підсилювача (частотна роздільна здатність);

n – показник заломлення середовища ОВ.

Ця формула показує, що ПРЗ залежить від часової (Δt) та частотної роздільної здатності зондуючого імпульсу. Вона допомагає побачити, наскільки точно OTDR зможе ідентифікувати короткі ділянки ОВ або точні точки стиків і пошкоджень. Чим менше значення Δt та, чим ширший спектр (Δf), тем вище Δl і вища якість вимірів.

б) Точність вимірювання відстані.

Визначення відстані до тієї ділянки лінії, де відбувається різка зміна показника заломлення (що фактично відповідає місцю пошкодження волокна), є одним із ключових завдань під час здійснення експлуатаційного контролю ВОЛЗ. У процесі проведення тестування таких ліній проблема точної локалізації дефектів набуває певної специфіки, яка є характерною саме для технологій проведення оптичних вимірювань.

У разі застосування OTDR для визначення координат пошкодження слід враховувати, що прилад фіксує час проходження оптичного імпульсу до місця

дефекту та його повернення. Отримане значення часу треба використати для розрахунку відстані від торця ОВ до точки несправності. При цьому довжина ВОК буде відрізняється від сумарної фізичної довжини ОВ, що входять до його складу, та залежить також від індивідуальних характеристик конкретного типу кабелю.

Точність визначення відстані можна характеризувати значенням величин абсолютної і відносної помилки, що виникає при вимірюванні відстані. Необхідність здійснення перерахунку, а також потенційна неточність внутрішньої системи відліку часу OTDR, зумовлюють появу сталої відносної помилки, яка відома як помилка масштабування. Абсолютна помилка (Δm) визначення довжини ОВ розраховується як добуток відносної помилки масштабування (d_m) на довжину (L) [14]:

$$\Delta m = d_m \cdot L \quad (2.5)$$

Досить вагомий вклад у формування d_m вносять помилка визначення показника заломлення, нестабільність тактової частоти, а також помилки дискретизації і локалізації. Значення помилки дискретизації залежить від продуктивності АЦП. Помилка локалізації витікає із неточного встановлення просторового положення події внаслідок наявності впливів шумових складових та безпосередньо пов'язана з ПРЗ оптичного рефлектометра. Треба також звернути увагу на те, що величина локалізаційної помилки істотно залежить від характеру події, алгоритму її ідентифікації по місцеположенню, а також від рівня наявного шуму в точці проведення вимірювань [14, 19].

7) Точність вимірювання загасання.

Розрахунок величини загасання оптичним рефлектометром здійснюється непрямим способом і визначається інтенсивністю сигналу зворотного розсіювання. Внаслідок змін коефіцієнта зворотного розсіювання можуть виникати вимірювальні помилки, що не пов'язані з технічними параметрами самого OTDR. Помилки у разі здійснення вимірювань загасання зумовлені неточністю вимірювання потужності зворотно розсіяного оптичного сигналу. У більшості типів OTDR перетворення оптичного сигналу в електричний здійснюється за допомогою приймального перетворювача (рис. 2.1), який, як

значалося раніше, містить фотодетектор та попередній підсилювач. Якщо умови для перетворення є ідеальними, то електричний струм має бути лінійно пропорційним оптичній потужності. Вихідний струм цього перетворювача надалі обробляється цифровою вимірювальною системою [14].

Помилки при вимірюваннях виникають через шуми, що вносяться перетворювачем, а також за рахунок випадкових помилок вимірювача і через нелінійність параметрів фотодетектора та попереднього підсилювача.

В OTDR помилку, що виникає у процесі вимірювань загасання, описують так званою лінійністю рефлектометра (LN), що визначається наступним чином [14]:

$$LN = \frac{\Delta A}{A}, \quad (2.6)$$

де ΔA – відхилення значення загасання, що було виміряне, від фактичного, дБ;
 A – фактичне значення загасання, дБ.

Похибка вимірювання і коефіцієнта загасання OB також відноситься до найважливіших параметрів OTDR. Її величина визначається як властивостями приймального вузла OTDR, так і особливостями сигналу зворотного розсіювання.

У разі збільшення масштабу рефлектограми на дисплеї OTDR можна побачити, що навіть формально однорідне OB проявляє неоднорідності та шумові флуктуації. Серед основних причин такої нерівномірності можна виділити залежність оптичних втрат у компонентах рефлектометра від поляризаційних параметрів вхідного випромінювання та інтерференцію складових зворотно розсіяного сигналу, що надходять від різних ділянок зондуючого оптичного імпульсу [20].

3 МЕТОДИ РЕФЛЕКТОМЕТРІЇ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ У ВОЛЗ

3.1 Когерентна рефлектометрія

Вже було зазначено, що на цей час найбільш поширеним типом OTDR є імпульсні рефлектометри, конструктивні особливості та принцип роботи яких описані у другому розділі цієї кваліфікаційної роботи (див. рис. 2.1). Зокрема Рефлектометр подає у волокно потужний зондуєчий імпульс і проводить вимірювання потужності та часу відставання зворотних сигналів. В ОВ зворотне випромінювання формується не тільки внаслідок відбиття від макродефектів (у порівнянні з λ), але й також за рахунок релєївського розсіювання на мікроскопічних флуктуаціях показника заломлення кварцового скла, «заморожених» у процесі витяжки волокна. Розмір таких неоднорідностей (так званих релєївських центрів) значно менше λ , тому світло розсіюється в усіх напрямках, у тому числі і назад в моду ОВ. Релєївські центри розподілені уздовж ОВ рівномірно та однорідно, і розсіяний на них оптичний сигнал несе в собі інформацію про параметри лінії, що впливають на поглинання світла. Завдяки реєстрації розсіяного випромінювання OTDR виявляє неоднорідності, які не відбивають сигнал, але викликають додаткові втрати на поглиннні. Частка зворотньо-розсіяної потужності світла є дуже малою (так, наприклад, при ширині імпульсу 1 м і його тривалості близько 10 нс коефіцієнт зворотнього релєївського розсіювання має величину приблизно -70 дБ). З цієї причини OTDR посилає в ОВ імпульси великої потужності і великої тривалості, а для реєстрації розсіяних назад імпульсів застосовуються високочутливі фотодетектори [21].

Одним із способів підвищення якісних показників робочих характеристик OTDR є застосування схем, що засновані на принципах когерентного прийому. Це дозволяє добитися максимально високої чутливості оптичного приймача. Перевагою застосування принципів когерентного прийому в рефлектометрії є можливість використання оптичним передавачем і приймачем одного і того ж джерела опорного сигналу (гетеродина). Це дозволяє вирішити питання щодо стабілізації частоти оптичного випромінювання. Оптичний рефлектометр на основі когерентної оптичної рефлектометрії у часовій області (Coherent OTDR, C-OTDR)

дозволяє отримувати високу просторову роздільну здатність (<10 мкм) і може застосовуватися для вимірювань в інтегрально-оптичних і біологічних структурах. Функціональна схема метода когерентної рефлектометрії на основі використання C-OTDR показана на рис. 3.1 [21, 22].

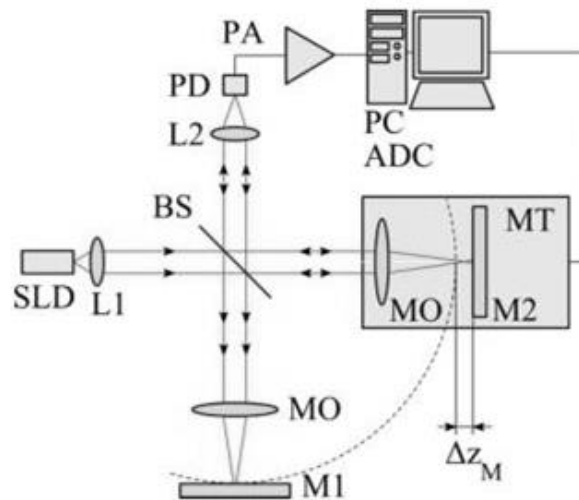


Рисунок 3.1 – Функціональна схема метода рефлектометрії C-OTDR

В основі роботи цього методу лежить інтерференційне змішування сигнального випромінювання, що розсіяне у волокні, з опорним випромінюванням, яке сформоване від того ж джерела. Оптичне випромінювання генерується суперлюмінесцентним діодом (Superluminescent Diode, SLD) і формується за допомогою оптичної лінзи (Lens, L1). Далі випромінювання надходить на блок розгалуження (Beam Splitter, BS), де воно розділяється на сигнальне і опорне плечі інтерферометричної схеми. Сигнальний пучок через мікроскопічний об'єктив (Microscope Objective, MO) уводиться в ОВ, що тестується, в якому в результаті Релеївського розсіювання формується зворотне випромінювання, що несе інформацію про локальні неоднорідності та зміни параметрів волокна [22].

Опорний сигнал направляється в еталонне плече інтерферометра і відбивається від дзеркала (Mirror, M2), яке встановлене на моторизованому трансляційному механізмі (Motorized Translation stage, MT). Цей механізм призначений для зміни положення дзеркала M2 на необхідну величину Δz_M , що дозволяє змінювати оптичну довжину опорного плеча і, відповідно, оптичну

різницю ходу між опорним і сигнальним каналами. Дзеркало M1 в сигнальному плечі забезпечує формування відповідного інтерференційного контуру. Зворотньо-розсіяне випромінювання з ОВ і опорний сигнал знову поєднуються на BS і направляються на фотоприймач (Photodetector, PD) через лінзу L2. У PD відбувається когерентне гетеродинне детектування, в результаті якого оптичний інтерференційний сигнал перетворюється в електричний сигнал, що містить інформацію як про амплітуду, так і про фазу зворотньо-розсіяного випромінювання [22].

Отриманий електричний сигнал підсилюється попереднім підсилювачем (Preamplifier, PA), після чого оцифровується аналого-цифровим перетворювачем (Analog-to-Digital Converter, ADC) і передається на персональний комп'ютер (PC) для подальшої цифрової обробки. Шляхом покрокової зміни оптичної довжини опорного плеча інтерферометра на величину Δz_m здійснюється просторова селекція сигналів, що відповідають різним ділянкам ОВ. Це дозволяє відновлювати розподіл параметрів лінії вздовж її довжини і реєструвати малі зовнішні впливи, такі як механічні деформації, температурні зміни і акустичні коливання [22].

Когерентна рефлектометрія на основі Релеївського зворотного розсіювання використовується для заміни низки окремих волоконних датчиків одним чутливим ОВ у різних сферах застосування, зокрема таких як моніторинг стану трубопроводів або конструкцій цивільного будівництва. Для великих ВОЛЗ і, відповідно, довгих ОВ, генерація імпульсного зонда може стати проблемою. Як правило, використовуються акустооптичні модулятори. У рефлектометрії ОВ Релеївське розсіювання є основною частиною процесу поширення в разі здійснення взаємодії сигнальних хвиль з частками речовини середовища в порівнянні з іншими видами розсіювання (наприклад, Бріллюєнове або Раманівське) [21].

3.2 Частотна рефлектометрія

Метод оптичної рефлектометрії частотної області (Optical Frequency Domain Reflectometer, OFDR) реалізує розподілене зондування ОВ в частотній області, але також може використовуватися і в часовій області. Він ґрунтується на λ

гомодинної інтерферометрії і дозволяє досягати двоточної ПРЗ у 22 мкм при оптичній довжині понад 35 метрів і чутливості – 97 дБ. Одноразове вимірювання проводиться всього за кілька секунд. Методи OFDR можна розділити на дві основні категорії: некогерентні OFDR (Incoherent Optical Frequency Domain Reflectometry, I-OFDR) і когерентні OFDR (Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry, C-OFDR).

3.2.1 Некогерентна частотна рефлектометрія

Низькокогерентний метод зазвичай використовується для субміліметрової ПРЗ вимірювання з дуже високою чутливістю, тобто тут діапазон проведення вимірювань є значно обмеженим (< 5 м), а дальність може досягати порядку кількох кілометрів, але при досить низькій ПРЗ. Цей метод, як правило застосовується для вимірів у невеликих оптичних лініях, наприклад, для виявлення деформацій і тріщин у полімерних оптичних волокнах, які є компонентом ВОЛЗ для підключення станційного обладнання та в якості оптичних шнурів. Функціональна схема методу частотної рефлектометрії на основі I-OFDR наведена на рис. 3.2 [21, 23].

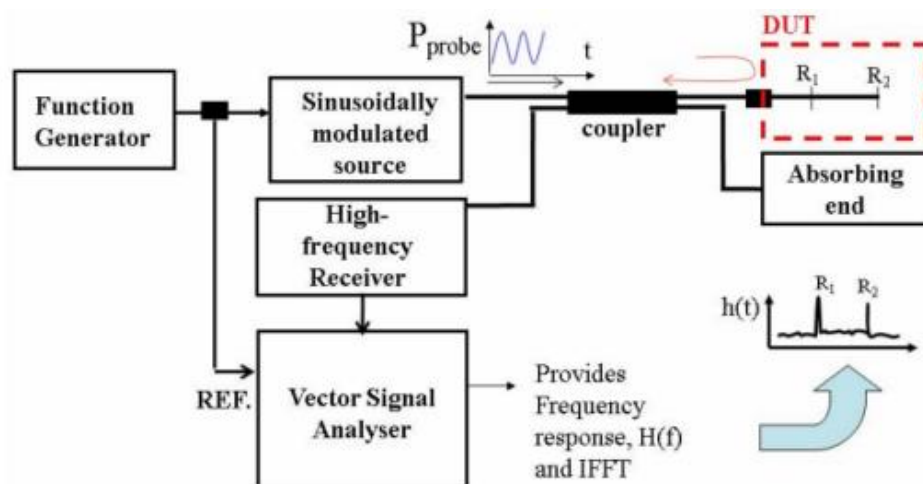


Рисунок 3.2 – Функціональна схема методу частотної рефлектометрії на основі I-OFDR

На відміну від методів вимірювань у часовій області, просторова інформація в I-OFDR отримується за допомогою перетворення з частотної області

в часову (просторову) з використанням зворотного перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є частотної характеристики дає імпульсну характеристику в часовій області за умови, що діапазон частот, що скануються, є достатньо великим [21, 23].

Зондуючий сигнал у вигляді безперервної λ оптичної несучої формується за допомогою генератора сигналів (Function Generator), який створює модулюючий вплив на оптичне джерело із синусоїдальною модуляцією (Sinusoidally Modulated Source). В результаті джерело формує оптичне випромінювання з гармонічною модуляцією потужності на частоті, яка періодично змінюється в заданому діапазоні частот або ступінчасто (метод ступінчастої частоти), або неперервно (метод розгортки частоти). Це випромінювання з потужністю P_{probe} вводиться в ОВ, що тестується (на рис. 3.2 це узагальнено показано як пристрій, що тестується (Device Under Test, DUT)), через розгалужувач (Coupler) [21, 23].

В DUT формується зворотне випромінювання, що обумовлене Релеївським розсіянням, а також відбиттями від локальних неоднорідностей (R_1 , R_2). На дальньому кінці лінії може бути встановлений поглинаючий елемент (absorbing end), який призначений для придушення відбиттів від торця оптичного волокна і запобігання паразитним інтерференційним ефектам [23].

Зворотньо-розсіяний оптичний сигнал через розгалужувач надходить на високочастотний приймальний пристрій (High-frequency Receiver), в якому здійснюється когерентне детектування та перетворення оптичного сигналу в електричний. При цьому реєструється амплітуда та фазовий зсув відгуку системи, що залежать від частоти модуляції зондуючого сигналу [23].

Зворотньо-розсіяні та зворотньо-відбиті оптичні сигнали Релея визначаються як функція частоти модуляції і обробляються у векторному аналізаторі сигналів (Vector Signal Analyser) для визначення частотної характеристики волокна $H(f)$. Для синхронізації вимірювань використовується опорний сигнал (REF), що надходить від генератора сигналів. На основі вимірної частотної характеристики ОВ виконується зворотне швидке перетворення Фур'є (IFFT), в результаті чого відновлюється імпульсна характеристика лінії $h(t)$, що відповідає розподілу відбиваючих і розсіюючих неоднорідностей уздовж волокна [21, 23].

Таким чином, просторова роздільна здатність і дальність вимірювань в методі на основі I-OFDR визначаються діапазоном і кроком переналаштування частоти модуляції, а також стабільністю джерела оптичного випромінювання.

3.2.2 Когерентна частотна рефлектометрія

Метод когерентної рефлектометрії, що реалізується рефлектометрами C-OFDR здійснює розподілену діагностику оптичного волокна в частотній області на основі лінійного переналаштування оптичної частоти зонduючого випромінювання та когерентної інтерференційної реєстрації зворотньо-відбитого сигналу. Цей метод забезпечує високу ПРЗ, що визначається діапазоном переналаштування оптичної частоти, а також високу чутливість за рахунок когерентного детектування. Функціональна схема методу частотної рефлектометрії на основі C-OFDR наведена на рис. 3.3 [21, 23].

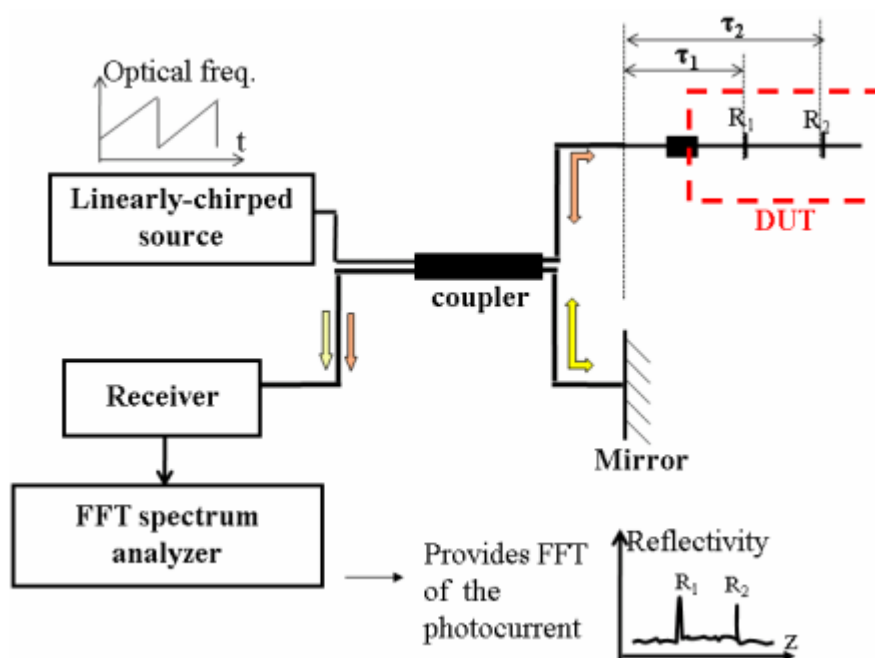


Рисунок 3.3 – Функціональна схема методу частотної рефлектометрії на основі C-OFDR

Зонduюче оптичне випромінювання формується джерелом з лінійною частотною модуляцією (Linearly-chirped source), в якому оптична несуча частота лазерного джерела, що переналаштовується, змінюється лінійно у часі без стрибків моди. Сформоване випромінювання частотно-модульованого оптичного сигналу (сигналу зондування) надходить на розгалужувач (Coupler), де розділяється на два, одне з яких зондує ОВ, а інше використовується в якості

опорного сигналу (або локального генератора). Таким чином формуються сигнальне і опорне плечі інтерферометричної схеми [21, 23].

Сигнальне випромінювання направляється в ОВ, що тестується (DUT), в якому виникають відбиття від локальних неоднорідностей і дефектів (R_1 , R_2), а також Релеївське розсіювання. Кожне відбиття характеризується власною затримкою поширення (τ_1 , τ_2), що визначається відстанню до відповідної ділянки волокна, де виявлена неоднорідність [23].

Опорне випромінювання розповсюджується по еталонному плечу інтерферометра і відбивається від дзеркала (Mirror), формуючи опорний сигнал з фіксованою оптичною довжиною шляху. Відбитий (тестовий) сигнал і опорне випромінювання знову когерентно інтерферують (суміщаються) на розгалужувачі і далі отриманий інтерференційний сигнал направляється в приймальний тракт [23].

У приймальному модулі (Receiver) здійснюється когерентне детектування інтерференційного сигналу. Внаслідок лінійної перебудови оптичної частоти джерела, кожен відбитий компонент сигналу перетворюється в електричне биття з частотою, що є пропорційною затримці поширення τ_i , а отже – відстані до відбиваючої неоднорідності [23].

В аналізаторі спектру на основі швидкого перетворення Фур'є (FFT spectrum analyzer) виконується спектральний аналіз. В результаті формується спектр, який після перерахунку за частотною шкалою відповідає розподілу коефіцієнта відбиття вздовж волокна (Reflectivity). Таким чином, розташування піків у спектрі однозначно пов'язані з просторовим розташуванням відбиваючих ділянок (R_1 , R_2) в DUT [23].

3.3 Оцінка роздільної здатності і динамічного діапазону методів OFDR і OTDR

Із розглянутих функціональних особливостей методів частотної рефлектометрії на основі I-OFDR та C-OFDR, а також методів OTDR можна бачити, що в них використовується лінійна модуляція частоти оптичного сигналу (F). При цьому, F буде пов'язана із затримкою τ проходження зондуєчого сигналу до ділянки ОВ з деякою координатою l за наступним виразом [23]:

$$F = \gamma \cdot \tau = (2W \cdot F_m) \cdot \left(\frac{2nl}{c}\right), \quad (3.1)$$

де W – девіація частоти зонduючого оптичного випромінювання;

F_m – частота повторення функції модуляції зонduючого випромінювання;

γ – швидкість переналаштування частоти зонduючого оптичного випромінювання. Її можна визначити за наступним виразом:

$$\gamma = \frac{df}{dt} = 2W \cdot F_m; \quad (3.2)$$

Зі спектра сигналу розподіл коефіцієнта відбиття вздовж волокна на ділянці ОВ з деякою координатою l формується за формулою:

$$l = \frac{c}{4nW} \cdot \frac{F}{F_m}; \quad (3.3)$$

У методах OFDR, на відміну від методу імпульсної рефлектометрії OTDR, ПРЗ визначається не тривалістю зонduючого імпульсу, а величиною девіації частоти [14, 23]:

$$\Delta l = \left(\frac{c}{4nW}\right) \cdot \left(\frac{\Delta F}{F_m}\right); \quad (3.4)$$

де ΔF – точність вимірювання спектру оптичного сигналу.

Також на відміну від методу OTDR в методі OFDR для покращення ПРЗ необхідно не розширювати смугу пропускання блоку обробки, а зменшувати. Чим буде вужчою смуга пропускання фільтра в блоці аналізатора спектру (рис. 3.3 і 3.3), тим буде кращою спектральна роздільна здатність оптичного сигналу биття і, відповідно, буде кращою ПРЗ. Ця відмінність показує перевагу у застосуванні методу OFDR. Так для РЗ біля 1-го метра в OTDR необхідно забезпечити смугу пропускання блоку обробки (рис. 2.1) близько 100 МГц, а в рефлектометрії OFDR можна використовувати аналізатора спектру зі смугою $\Delta F = 0,01$ Гц [14, 23].

Якщо прийняти, що спектральна щільність шуму OTDR і OFDR будуть рівними, тобто $p_{nt} = p_{nF}$, то виграш у шумах приймального модуля OFDR можна оцінити як [14]:

$$\frac{p_{nF}}{p_{nt}} = \left(\frac{\Delta f}{\Delta F}\right)^{\frac{1}{2}} = 10^5. \quad (3.5)$$

Особливостями сигналу биттів є наступна умова: $\Delta F \geq F_m$, звідси можна визначити ПРЗ, як [14]:

$$\Delta l \geq \frac{c}{4nW} = \frac{50}{W}, \text{ МГц.} \quad (3.6)$$

У табл. 3.1 наведені значення, що характеризують залежність ПРЗ від величини девіації частоти зондуючого сигналу.

Таблиця 3.1 – Залежність РЗ від величини W

W	1 МГц	10 МГц	100 МГц	1 ГГц	10 ГГц	100 ГГц
Δl	50 м	5 м	0,5 см	5	5 мм	0,5 мм

Смуга пропускання аналізаторів спектру сигналу биття OFDR не залежить від ПРЗ і тому її можна визначити через параметр часу обробки наступним чином:

$$\Delta F = \frac{1}{T_0}. \quad (3.7)$$

$$p_{nF} = p_n(\Delta F)^{\frac{1}{2}} = p_n(T_0)^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.8)$$

Таким чином, для методів рефлектометрії OFDR динамічний діапазон визначається за формулою [14]:

$$D = < 0,5l(P_s - \alpha_c + G_{R_0} - p_{nF} + 10 \log \frac{\Delta l}{\Delta l_0}). \quad (3.9)$$

Зробимо оцінку динамічного діапазону при $p_n = -110 \text{ дБм(Гц)}^{-1/2}$. Для цього прийемо додатково наступні параметри :

$$T_0 = 100 \text{ с};$$

$$p_{nF} = -120 \text{ дБм};$$

$$P_s = 20 \text{ дБм};$$

$$\alpha_c = 6 \text{ дБ}.$$

Для ПРЗ $\Delta l = 1 \text{ м}$ і коефіцієнта зворотного Релеївського розсіювання $G_{R_0} = -73 \text{ дБ}$, значення якого є таповим для SMF на довжинах хвиль 1310 нм і 1550 нм, динамічний діапазон буде становити $D = 30 \text{ дБ}$.

У таблиці 3.2 наведено оцінка динамічного діапазону для методів рефлектометрії OTDR $(D)_T$ і OFDR $(D)_F$ при $\Delta l_0 = 1 \text{ м}$; $G_{R_0} = -73 \text{ дБ}$; $p_{n0} = -70 \text{ дБм}$; $p_{nF} = -121 \text{ дБм}$; $P_s = 20 \text{ дБм}$; $\alpha_c = 6 \text{ дБ}$; $N = 2^{16}$; $T_0 = 160 \text{ с}$ для просторової різної роздільної здатності Δl наведена у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Оцінка динамічного діапазону (D_{dB}) для методів рефлектометрії OTDR і OFDR

Δl	1 м	10 м	100 м	1 км	2 км
$(D)_T, \text{дБ}$.	17,5	25	32,5	40	42
$(D)_F, \text{дБ}$.	31	36	41	46	47,5

З таблиці 3.2 можна бачити, що частотні оптичні рефлектометри OFDR найбільш ефективно функціонують при високих вимогах до ПРЗ, де вираш за динамічним діапазоном буде найбільшим. До переваг застосування методів вимірювань на основі OFDR також можна віднести більш просту реалізацію приймального модулю рефлектометра із збереженням ефективності його роботи, зокрема АЦП. Оскільки сигнал биття, являє собою сигнал звукових частот (десятки кГц), то можна застосовувати значно точніші і при цьому дешевші АЦП. До недоліків OFDR належать суттєві, досі не повністю розв'язані проблеми, пов'язані з аналізом спектра сигналу биття (зокрема у випадку релеївського розсіювання), а також труднощі забезпечення необхідної довжини когерентності та стабільних режимів модуляції зондуючого сигналу [21 - 23].

4 ТИПОВА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОНДУЮЧОГО СИГНАЛУ НА ОСНОВІ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

Визначимо параметри типового зондуючого сигналу, який може бути застосований для проведення вимірювання параметрів оптичних волокон з використанням рефлектометрів. У [24] наведено реалізацію методу рефлектометрії частотної області, для реалізації якого застосовується зондуючий сигнал з поданням спектра у вигляді набору частотних компонентів, що розташовані через рівні часові інтервали. Особливістю запропонованого методу є отримання спектрограми огинаючої спектра суми переданого і прийнятого (відбитого і розсіяного) оптичних сигналів. Орієнтуючись на таку спектрографічну рефлектограму, можна зробити припущення, що спектр зондуючого сигналів буде являти собою сітку частот з рівномірним кроком. При виборі мінімальної частоти в спектрі також зробимо припущення, що часовий інтервал є кратним періодам всіх спектральних складових, має перевищувати подвоєний час розповсюдження випромінювання в оптичному волокні, що тестується з $n_1 = 1,4675$. Це необхідно для запобігання виникнення помилкових піків на спектрографічній рефлектограмі. Цю умову можна виконати, якщо час подвійного проходження сигналу в ОВ буде меншим за період спектральної складової зондуючого сигналу, яка має мінімальну частоту f_H [25]:

$$2 \cdot T_{\text{пр}} = \frac{L}{V} = \frac{n_1 L}{c} < t_{\text{max}} = \frac{1}{f_H}, \quad (4.1)$$

де $T_{\text{пр}}$ – час проходження оптичного сигналу по ОВ між двома його кінцями;

L – довжина ОВ, м;

V – швидкість розповсюдження світлових хвиль у ОВ, м/с;

n_1 – показник заломлення кварцового скла в серцевині ОВ;

c – швидкість світла у вільному просторі (вакуумі), м/с

t_{max} – період спектральної складової, частота якої дорівнює f_H ;

Верхня частота має забезпечувати необхідну роздільну здатність Δl . У попередньому розділі при проведенні аналізу динамічного діапазону для методів OTDR і OFDR, було прийнято, що $\Delta l = 1$ м. Із врахуванням границь частотної

області, що займається вимірювальним сигналом Δl може бути визначена за наступною формулою [24, 25]

$$\Delta l = \frac{c(f_B + f_H)^2}{8(f_B - f_H) \cdot n_1^2 f_B f_H}, \quad (4.2)$$

де f_B і f_H – верхня і, відповідно, нижня границі області частот, що займається вимірювальним сигналом [25].

Оскільки частота f_H є досить низькою (по відношенню до f_B), то Δl буде визначатися саме за верхньою частотою. За допомогою виразу (4.2) можна показати, що при $\Delta l = 1$ м значення $f_B = 175$ МГц.

Використовуючи теорему Котельникова, спочатку вибираємо довжину елемента моделі ОВ, зокрема рівною 0,5 м. Можна показати, що у разі розповсюдження електромагнітних хвиль у середовищі з $n_1 = 1,4675$, частоті 175 МГц буде відповідати $\lambda = 1,168$ м. Це означає, що довжина елемента ОВ, що є рівною 0,5 м в цьому випадку, також буде задовольняти умові теореми Котельникова, адже спектральній складовій максимальної частоти відповідає не менше двох відліків [25].

Якщо, наприклад, довжина волокна, що тестується, є рівною 1024 м, то його модель можна представити у вигляді 2048 елементів, тобто аналіз повного набору прийнятих даних методом, що тут пропонується, можливий лише в разі не більше ніж дворазового проходження оптичного сигналу по волокну (за умови, що відбиваючі неоднорідності є розташованими на його початку і кінці). При цьому таблиця на прийомі має містити 4096 елементів. Тому вивчення резонансних явищ у ОВ необхідно проводити з використанням неоднорідностей, що знаходяться близько від його початку. Зазначене обмеження довжини може в деяких випадках істотно вплинути лише на помилкові піки рефлектограми (тобто виключити їх появу), що є повністю допустимим [25].

За вказаних вище умов частота дискретизації ($f_{\text{дискр}}$) не має бути меншою ніж $175 \cdot 2 = 350$ МГц. До того ж, враховуючи те, що [25]:

$$f_{\text{дискр}} = 4f_{\text{max}}, \quad (4.3)$$

де f_{\max} – максимальна частота для здійснення перетворення Фур'є (центр шкали, точка розмежування основної та дзеркальної областей), то для (4.3) має виконуватися наступна умова:

$$f_B < f_{\max} = f_{\text{дискр}} / 4. \quad (4.4)$$

Тобто, з'являється ще одне обмеження, і як результат, Δl при аналізі падає вдвічі (адже для отримання правильного результату треба забезпечити виконання нерівності (4.4), а це означає відмову від присутності в спектрі елементів з частотами вище $f_{\text{дискр}} / 4$). Отже, для збереження потрібної Δl необхідно в два рази зменшити довжину елемента моделі ОВ, тобто, необхідно прийняти її рівною 0,25 м. Довжина всього ОВ, що тестується, при цьому становитиме 512 м. Як видно, за цих припущень загальна кількість елементів моделі ОВ буде збережено на рівні 2048-ми елементів [25].

Визначимо точне значення $f_{\text{дискр}}$. Для цього будемо використовувати вираз [25]:

$$f_{\text{дискр}} = \frac{V}{l_e} = \frac{c}{n_1 l_e}, \quad (4.5)$$

де l_e – довжина елемента ОВ, м.

Звідси отримаємо

$$f_{\text{дискр}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,4675 \cdot 0,25} = 817717206 \text{ Гц} \approx 817,7 \text{ МГц},$$

Звідси можна бачити, що один елемент здійснює передачу оптичного сигналу із входу на вихід за час, що дорівнює $1,22292 \cdot 10^{-9}$ с.

Більш глибока обробка даних була виконана з використанням пакету Microsoft Excel, оскільки до його складу входить пакет аналізу, що дозволяє, зокрема, здійснювати також і перетворення Фур'є. При цьому приймалося, що максимальне число відліків вхідного оптичного сигналу є рівним 4096. Враховуючи той факт, що лише половина вихідних відліків утворює спектральне подання сигналу (натомість інша половина відповідає його дзеркальному відображенню), а також враховуючи те, що запропонований метод базується на

послідовному проведенні двох перетворень Фур'є, то можна стверджувати, що кількість відліків спектрографічної рефлектограми буде становити 1024. Якщо взяти до уваги вказане вище співвідношення частоти дискретизації і максимальної частоти спектра зонduючого сигналу (4.4), то є очевидним, що в подальшій обробці даних може бути використана всього лише чверть відліків за результатами першого перетворення Фур'є. Тому, за цих умов, спектрографічна рефлектограма має містити у собі не більше 512 частотних відліків.

Оскільки спектрограма суми сигналів має 2048 частотних відліки, і тільки половина з них використовується в подальшій обробці оптичного сигналу, то для того, щоб досягти максимальної Δl при заданих умовах, спектр зонduючого оптичного сигналу має містити 1024 лінії. Тепер, шляхом ділення максимальної частоти спектру f_B на відповідну кількість спектральних ліній ($N = 1024$), можна визначити величину частотного інтервалу δf між ними, зокрема [25]:

$$\delta f = \frac{f_B}{N} = \frac{175 \cdot 10^6}{1024} = 170898,4375 \text{ Гц} = 170,9 \text{ кГц}. \quad (4.6)$$

Рівним за своїм значенням цьому інтервалу буде також і мінімальна частота f_H у спектрі. Зробимо її перевірку на відповідність зазначеному вище критерію (4.1), зокрема [25]:

$$2 \cdot T_{\text{пр}} = \frac{n_1 L}{c} = \frac{1,4675 \cdot 512}{3 \cdot 10^8} = 2,5045 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

$$t_{\text{max}} = \frac{1}{f_H} = \frac{1}{170898,4375} = 5,85143 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Тобто можна бачити, що умова (4.1) виконується. Такий сигнал є фактично сумою сигналу основної частоти 170,9 кГц і 1023 її вищих гармонік.

Треба звернути увагу на те, що спектральний аналіз такого типу сигналу за допомогою вищезазначеного методу, дає недостовірний результат, якщо початкові фази всіх складових оптичного спектру є однаковими (тобто є рівними нулю). З метою домогтися правильного формування спектрограми, було запропоновано увести приріст початкової фази кожної наступної спектральної складової (по мірі зростання частоти). Цей приріст складає $3 \cdot \pi/4$ [25].

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуті конструктивні особливості та принцип роботи оптичних рефлектометрів, проведено аналіз основних методів рефлектометрії, що застосовуються ними для здійснення вимірювань параметрів у ВОЛЗ, наведені основні технічні параметри рефлектометрів та запропонована методика їх визначення та оцінки.

Виходячи з того, що стрімке впровадження ВОЛЗ є наслідком переваг, що впливають з особливостей поширення сигналу в ОВ та їх типів, то у першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто загальні конструктивні особливості ОВ принципи розповсюдження світла по ним та основні типи втрат, що в них виникають. Показано, що коректне визначення повних втрат у ВОЛЗ потребує комплексного врахування низки складових. До них належать втрати оптичного сигналу, зумовлені процесами розсіювання та поглинання випромінювання в оптичному волокні, втрати на вигинах волокна, а також втрати, що виникають у місцях зварних і роз'ємних з'єднань. Додатково суттєвий вплив на сумарний рівень загасання мають пасивні елементи оптичної лінії, зокрема сплітери, фільтри, мультиплексори та атенюатори. Сукупність зазначених складових формує повні втрати у ВОЛЗ, облік яких дає змогу ще на етапі проектування обґрунтовано оцінити очікувані якісні показники системи та забезпечити відповідність заданим технічним вимогам. Також у цьому розділі було розглянуто основні типи пристроїв вимірювання втрат у ОВ, зокрема: оптичні тестери (OLTS) та оптичні рефлектометри. Показано, що OLTS забезпечують визначення сумарних втрат оптичної лінії, однак потребують використання двох приладів із підключенням до обох її кінців. Натомість оптичні рефлектометри дозволяють здійснювати детальний аналіз просторового розподілу втрат уздовж лінії за умови підключення лише з одного боку. Встановлено, що зазначені прилади реалізують різні принципи та методи вимірювання, що зумовлює доцільність їх вибору залежно від поставлених завдань контролю та діагностики ВОЛЗ [5, 6, 14].

У другому розділі кваліфікаційної роботи проаналізовано конструктивні особливості та загальні принципи функціонування оптичних рефлектометрів на прикладі імпульсних оптичних рефлектометрів (OTDR), які на сьогодні є найбільш поширеними приладами, що використовуються для вимірювання параметрів ВОЛЗ. Встановлено, що їх принцип дії базується на аналізі відбитих

оптичних імпульсів, зумовлених явищами зворотного розсіювання світла в ОВ та відбитті оптичного сигналу в тих ділянках ОВ, де спостерігаються різкі зміни показника заломлення. Показано, що результатом вимірювань формується рефлектограма, форма та складові якої відповідають структурі оптичної лінії, що тестується, і відображають рівень зворотного розсіювання вздовж її довжини. Такий спосіб подання інформації забезпечує можливість як візуального, так і автоматизованого аналізу параметрів ОВ. Крім того, у розділі здійснено аналіз основних технічних характеристик оптичних рефлектометрів, що дозволяє визначати сферу їх застосування, оцінювати точність вимірювань та обґрунтовано обирати конкретну модель приладу з урахуванням умов експлуатації [5, 6, 14, 19].

У третьому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексний аналіз сучасних методів оптичної рефлектометрії, що застосовуються для вимірювання параметрів ВОЛЗ. Встановлено, що суттєвим обмеженням імпульсної рефлектометрії є зменшення динамічного діапазону за умов підвищених вимог до просторової роздільної здатності, що зумовлено одночасним зниженням рівня зворотно розсіяного релеївського сигналу та зростанням шумів при розширенні смуги пропускання приймального тракту. Показано, що використання когерентних схем імпульсної рефлектометрії дозволяє підвищити чутливість оптичного приймача та покращити робочі характеристики OTDR [21, 22].

Окрему увагу при виконанні цього розділу приділено методам оптичної рефлектометрії у частотній області (OFDR), які забезпечують розподілене зондування оптичного волокна з використанням частотної або часової обробки сигналів, та які служать альтернативою методам рефлектометрії на основі OTDR. Розглянуто некогерентні (I-OFDR) та когерентні (C-OFDR) методи, при цьому показано, що I-OFDR доцільно застосовувати для дослідження коротких оптичних ліній, зокрема під час контролю стану полімерних оптичних волокон. Натомість метод C-OFDR забезпечує високі значення просторової роздільної здатності та чутливості завдяки лінійному переналаштуванню оптичної частоти зондуючого випромінювання і когерентному детектуванню зворотно-відбитого сигналу. Звертається увага на те, що метод C-OFDR забезпечує високу ПРЗ, що визначається діапазоном переналаштування оптичної частоти, а також високу чутливість за рахунок когерентного детектування [23].

Крім того у розділі також проведена оцінка роздільної здатності і динамічного діапазону методів OFDR і OTDR. Зокрема показано, що рефлектометри OFDR є найбільш ефективними в умовах жорстких вимог до ПРЗ,

забезпечуючи при цьому вираш за динамічним діапазоном і спрощену реалізацію приймального модуля. Водночас встановлено, що застосування OFDR обмежується низкою технічних проблем, пов'язаних з аналізом спектра сигналу биття, забезпеченням необхідної довжини когерентності та стабільності режимів модуляції зондуючого сигналу, що потребує подальших досліджень і вдосконалення методів реалізації [21 - 23].

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи надана методика визначення параметрів зондуючого сигналу на основі обґрунтування моделі ОВ. Знання такої методики є необхідним для коректного налаштування рефлектометра та забезпечення заданої точності вимірювань параметрів ВОЛЗ. Від параметрів зондуючого сигналу безпосередньо залежать просторова роздільна здатність, динамічний діапазон і чутливість рефлектометрів. Це дозволяє оптимізувати процес вимірювань параметрів у ВОЛЗ з урахуванням довжини оптичних ліній, структури та умов експлуатації [24 - 25].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Laferriere J. Reference Guide to Fiber Optic Testing / J. Laferriere, G. Lietaert, R. Taws, S. Wolszczak. – JDSU, France, 2011. – 139 p.
2. Чебаненко В.І. Моніторинг параметрів в оптичних системах WDM із застосуванням OTDR/ В.І. Чебаненко, Ю.М. Колтун // 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>
3. Овчинникова И.А. Показатели надежности оптических кабелей. Срок сохраняемости и метод его оценки [Электронный ресурс] / И.А. Овчинникова, П.А. Семенов, А.С. Хахичев, В.А. Овчинников // Наука и техника. – №1 (405). – 2024. – С. 13 - 20. – Режим доступа: <http://www.kp-info.ru/sites/default/files/st-3-2024.pdf>. DOI 10.34757/2072-215X.2024.1.1.002.
4. Вимірювання в оптичних кабельних мережах [Електронний ресурс] // Відділ волоконно-оптичних технологій і кабельних мереж компанії ДЕПС. – 2024. – Режим доступа: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/articles/vymir-v-opticheskikh-kabelnyih-setyah.html#a6/>.
5. Смирнов И. Измерения на ВОЛС [Электронный ресурс] / Илья Смирнов // УЦ «ВОЛС. Эксперт». – 2023. – Режим доступа: <https://vols.expert/useful-information/izmereniya-vols/#причины-потерь-в-оптоволокне>.
6. Liu H. OTDR Development Based on Single-Mode Fiber Fault Detection / Hui Liu, Tong Zhao, Mingjiang Zhang // Sensors (MDPI). – 2025. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/14/4284>. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25144284>.
7. Колтун Ю.М. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Напрямні системи електричного та оптичного зв'язку» (частина 2)» підготовки бакалавра напряму 6.050903 «Телекомунікації» / Ю.М. Колтун. – Харків: ХНУРЕ, каф. ІМІ, 2017. – 237 с.
8. Розорінов Г.М. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. / Г.М. Розорінов, Д.О. Соловійов. – К.:Кафедра, 2012. – 344 с.
9. Шумкова Д.Б. Специальные волоконные световоды: уч. пособ. / Д.Б. Шумкова, А.Е. Левченко – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 178 с.

10. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Трендз, 2001 г. – 267 с.
11. Xtera Communications Inc. Компоненты DWDM систем и их характеристики] // LightWave Russian Edition. – 2005. – №2. – С. 50 - 56.
12. Миразимова Г.Х. Основы оптической связи: сб. лекций / Г.Х. Миразимова – Ташкент: Ташкентский университет информационных технологий (ТУИТ), 2008. – 119 с.
13. Листвин А.В. Оптические волокна для линий связи / А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков – М.: ЛЕСАРарт, 2003 – 288 с.
14. Листвин А.В. Рефлектометрия оптических волокон / А.В. Листвин, В.Н. Листвин – М.: ЛЕСАРарт, 2005 – 208 с.
15. Особливості волоконно-оптичних вимірів [Електронний ресурс] // «LanMarket» – Оптоволоконний зв'язок та телекомунікації. – 2022. – Режим доступу: <https://lanmarket.ua/ua/stats/volokonno-opticheskie-izmereniya/>.
16. Soller B.J. Optical Backscatter Reflectometry (OBR) [Електронний ресурс] / B.J. Soller, D.K. Gifford, M.S. Wolfe, M.E. Froggatt // Photonics. vol. 13 – №5. – 2019. – С. 452 - 460. – Режим доступу: https://www.photonics.su/files/article_pdf/7/article_7628_768.pdf. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.5.452.460.
17. Бунас В.Ю. Измерение параметров волоконно-оптических трактов: уч. пособ. / В.Ю. Бунас, В.Н. Тарченко, В.Н. Урядов. – Минск: БГУИР, 2013. – 68 с.
18. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Оптичні телекомунікаційні системи» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». /Укл.: Марченко С.В., Сотник О.А. - Кам'янське; ДДТУ, 2024 р. – 90 с.
19. Кобелев И. Рефлектометрия оптического кабеля [Електронний ресурс] / Иван Кобелев // УЦ «ВОЛС. Эксперт». – 2022. – Режим доступу: <https://vols.expert/useful-information/reflektogramma-opticheskogo-kabelya/>.
20. Как выбрать оптический рефлектор [Електронний ресурс] // Сайт компании TZ Group. – 2018. – Режим доступу: <https://tze1.ru/articles/detail/kak-vybrat-opticheskiy-reflektor/#subtitle4>.
21. Рефлектометрия оптических волокон [Електронний ресурс] // АО «ЛЛС» – специализированный дистрибьютор лазерно-оптического оборудования и компонентов. – 2022. – Режим доступу: <https://lenlasers.ru/novosti-i-stati/reflektometriya-opticheskikh-volokon/>.

22. Jasenek J. Coherent OTDR (CO-OTDR). The theory and application of the fiber optic sensors with spread parameters [Электронный ресурс] // THEIERE project No. 10063-CP-1- 2000-1-PT-ERASMUS-ETNE. – Режим доступа: http://www.eaeie.org/theiere_bratislava/4-1.html#ss4.1.

23. Kivilcim Y. Optical Frequency Domain Reflectometry: A Review / Kivilcim Yuksel, Marc Wuilpart, Véronique Moeuyaert, and Patrice Mégret [Электронный ресурс] // 11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). – 2009. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5185111>. DOI: 10.1109/ICTON.2009.5185111

24. Ситнов Н.Ю. Использование радиочастотных шумоподобных сигналов и сигнала трафика в оптической рефлектометрии / Н.Ю. Ситнов, Н.И. Горлов // Телекоммуникации. – № 7. – 2009 – С. 30 - 33.

25. Ситнов Н.Ю. Экспериментальная проверка метода рефлектометрии частотной области с широкополосным зондирующим сигналом / Н.Ю. Ситнов, Н.И. Горлов, И.В. Богачков // Вестник СибГУТИ. – № 3. – 2012 – С. 56 - 80.