

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 методологічних принципів вимірювань і моніторингу параметрів  
оптичних волокон у сучасних ВОЛЗ

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІМІзм-22-2

Бабак В.М.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 «Телекомунікації

та радіотехніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

«Інформаційно-мережна інженерія»

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Колтун Ю.М.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Безрук В.М.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

*/ Бабак В.М. /*

Керівник

*/ Колтун Ю.М. /*

Харківський національний університет радіоелектроніки

*Навчально-науковий центр заочної форми навчання*

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії

(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Інформаційно-мережна інженерія»

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« 27 » березня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Бабаку Віталію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз методологічних принципів вимірювань і моніторингу параметрів оптичних волокон у сучасних ВОЛЗ

затверджена наказом університету від « 27 » березня 2024 р. № 38 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 20 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Технологічна спрямованість проведення аналізу і досліджень – ВОЛЗ на основі технологій WDM. Методологічна основа проведення вимірювань: методи вимірювань OTDR. Методологічна основа організації системи моніторингу: система RFTS.

Запропонувати методіку здійснення оцінки відношення с/ш для оптичного сигналу методом OTDR у ВОЛЗ у разі відсутності і наявності оптичних підсилювачів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ

1. Технологічні особливості і принципи побудови волоконно-оптичних ліній зв'язку.

2. Аналіз методологічних принципів проведення вимірювань та моніторингу параметрів у сучасних ВОЛЗ.

3. Система моніторингу параметрів сучасних ВОЛЗ із застосуванням OTDR.

4. Методика реалізації системи моніторингу параметрів ОВ у ВОЛЗ.

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайди у форматі Power Point (назва, мета, задачі і актуальність роботи, спрощена структурна схема типової ВОЛЗ, загальні методи організації ОЛТ сучасних ВОЛЗ, схема спрощеного подання WDM-мультиплексування, основні методологічні принципи проведення вимірювань та моніторингу параметрів у сучасних ВОЛЗ, узагальнена функціональна схема системи моніторингу параметрів у ВОЛЗ, методи моніторингу оптичних кабелів на основі вимірювань OTDR в рамках системи RFTS, висновки)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	27.03 – 30.03.24	виконано
2	Підбір літератури за темою роботи.	31.03 – 07.04.24	виконано
3	Виконання розділу 1	08.04 – 20.04.24	виконано
4	Виконання розділу 2	21.04 – 07.05.24	виконано
5	Виконання розділу 3	08.05 – 20.05.24	виконано
6	Виконання розділу 4	21.05 – 02.06.24	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	03.06 – 06.06.24	виконано
8	Оформлення презентаційного матеріалу та подання роботи до ЕК	07.06 – 14.06.24	виконано
9	Підготовка до захисту та захист у ЕК	15.06 – 30.06.24	виконано

Дата видачі завдання 27 березня 2024 р.

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

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

(доц. Колтун Ю.М.)  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 86 с., 38 рис., 2 табл., 27 джерел, 1 додаток.

ХВИЛЬОВЕ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ, ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ, WDM, ВИМІРЮВАННЯ, СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, ОПТИЧНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ, ОПТИЧНИЙ СПЕКТР, ПОТУЖНІСТЬ СИГНАЛУ, OSNR, РЕФЛЕКТОГРАММА, OTDR, PMD, ТЕСТУВАННЯ, RFTS

Об'єкт дослідження – волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ).

Мета роботи – аналіз методологічних принципів проведення вимірювань і моніторингу параметрів оптичних волокон у кабелях сучасних ВОЛЗ.

Проаналізовані методологічні принципи вимірювань та моніторингу параметрів у сучасних ВОЛЗ. Запропонована і обґрунтована функціональна схема системи моніторингу параметрів у ВОЛЗ, зроблене дослідження методики реалізації системного моніторингу параметрів на основі вимірювань OTDR у ВОЛЗ із підсилювачами. Розглянута типова архітектурна реалізація системи віддаленого тестування оптичних волокон (RFTS). У відповідності з архітектурою RFTS проаналізовані та систематизовані методи моніторингу ОВ у багатоканальних ВОЛЗ на основі WDM у рамках застосування OTDR і системи управління RFTS.

## THE ABSTRACT

Explanatory note 72 pages, 38 fig., 2 tab., 27 sources, 1 app.

WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING, FIBER-OPTIC LINK of COMMUNICATION, WDM, MEASUREMENT, MONITORING SYSTEM, OPTICAL AMPLIFIER, OPTICAL SPECTRUM, SIGNAL STRENGTH, OSNR, REFLECTOGRAMMA, OTDR, PMD, TESTING, RFTS

Object of research – fiber optic communication line (FOCL).

The purpose of work – analysis a methodological principles of measurement and monitoring optical fiber parameters in modern fiber optic cables.

The methodological principles of measurement and monitoring parameters in modern FOCLs are analyzed. A functional diagram of the system for monitoring parameters in FOCLs is proposed and substantiated, and a study of the methodology for implementing system monitoring of parameters based on OTDR measurements in FOCLs with amplifiers is made. A typical architectural implementation of the remote fiber test system (RFTS) is considered. In conformance with the RFTS architecture, the methods for monitoring the OF in WDM-based multichannel FOCLs in the framework of OTDR and RFTS control system application are analyzed and systematized.

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	9
ВСТУП .....	11
1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ .....	15
1.1 Спрощена структурна схема типової ВОЛЗ та її компоненти .....	15
1.2 Загальні методи організації ОЛТ .....	18
1.3 Функціонально-технологічні особливості технологій сімейства WDM .....	21
1.4 Основні типи спотворень, що впливають на передачу інформаційних потоків по каналах ВОЛЗ на базі WDM-технологій .....	25
2 АНАЛІЗ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ПРИНЦИПІВ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ У СУЧАСНИХ ВОЛЗ.....	30
2.1 Основні вимоги щодо забезпечення вимірювань, контролю та моніторингу параметрів оптичних волокон у сучасних високошвидкісних ВОЛЗ.....	30
2.2 Аналіз методологічних принципів проведення вимірювань оптичного спектра.....	31
2.3 Аналіз методологічних принципів проведення моніторингу і вимірювань оптичної потужності .....	34
2.4 Аналіз методологічних принципів проведення моніторингу і вимірювань відношення сигнал/шум.....	37
2.5 Аналіз методологічних принципів проведення моніторингу PMD .....	38
2.6 Аналіз методологічних принципів проведення вимірювань з використанням оптичних рефлектометрів та їх структурна реалізація .....	43
2.6.1 Загальні особливості проведення вимірювань із застосуванням оптичних рефлектометрів .....	43
2.6.2 Конструктивні особливості OTDR.....	45

3 СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ СУЧАСНИХ ВОЛЗ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ OTDR .....	48
3.1 Технологічні особливості та принципи організації системи моніторингу параметрів у сучасних ВОЛЗ .....	48
3.2 Дослідження методики реалізації системного моніторингу параметрів на основі вимірювань OTDR у ВОЛЗ із підсилювачами .....	50
3.2.1 Загальні особливості методики.....	50
3.2.2 Оцінка відношення сигнал/шум методом OTDR у ВОЛЗ без ОП.....	51
3.2.3 Оцінка відношення сигнал/шум методом OTDR у ВОЛЗ з ОП.....	55
4 МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ОВ У ВОЛЗ.....	60
4.1 Архітектура системи віддаленого моніторингу ОВ .....	60
4.2 Методика моніторингу ОВ у багатоканальних ВОЛЗ на основі WDM у рамках системи управління RFTS .....	62
4.2.1 Одночасний моніторинг ОВ у багатоканальних ВОЛЗ.....	63
4.2.2 Рознесений у часі моніторинг ОВ у багатоканальних ВОЛЗ .....	65
4.2.3 Здійснення моніторингу по пасивних ОВ .....	66
4.2.4 Здійснення моніторингу по активних ОВ.....	67
ВИСНОВКИ .....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	75
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ .....	78

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- ASE (Amplified Spontaneous Emission) – підсилена спонтанна емісія;
- BER (Bit Error Rate) – коефіцієнт бітових помилок;
- CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexer) – розріджене (грубе) спектральне мультиплексування;
- DFB (Distributed Feedback Laser) – лазер з розподіленим зворотним зв'язком;
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – щільне спектральне мультиплексування;
- EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) – оптичний підсилювач на волокні, що леговане ербієм;
- FD – фотодетектор;
- FWM (Four-Wave Mixing) – чотирихвильове змішування;
- OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) – оптичний мультиплексор введення/виведення;
- ONT (Optical Network Terminal) – станції контролю мережі на основі оптичних мережних терміналів;
- OSA (Optical Spectrum Analyzer) – аналізатор оптичного спектру;
- OSNR (Optical Signal-to-Noise-Ratio) – відношення оптичної потужності сигналу до потужності оптичного шуму;
- OTAU (Optical Test Access Unit) – оптичний перемикач (комутатор), що забезпечує доступ до волокон, за якими здійснюється контроль;
- OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) – оптичний часово-імпульсний рефлектометр;
- PMD (Polarization Mode Dispersion) – поляризаційна модова дисперсія;
- PON (Passive Optical Network) – пасивна оптична мережа;
- RFTS (Remote Fiber Test System) – систем дистанційного тестування оптичних волокон;
- RTU (Remote Test Unit) – блок дистанційного тестування волокон;
- SDH (Synchronous Digital Hierarchy) – синхронна цифрова ієрархія;
- SNR (Signal to Noise Ratio) – відношення сигнал/шум;
- TDM (Time Division Multiplexing) – часове мультиплексування каналів;
- TFD – термофотодетектор;
- TSC (Test System Control) – центральний блок управління;

WDM (Wavelength Division Multiplexing) – спектральне (хвильове) мультиплексування каналів.

АЦП – аналого-цифрове перетворення;

БД – база даних;

ВКР – вимушене комбінаційне розсіювання;

ВОК – волоконно-оптичний кабель;

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;

ВСП – власні стани поляризації;

КУО – каналоутворююче обладнання;

ЛС – лазерна система;

НІЛ – напівпровідниковий інжекційний лазер;

ОВ – оптичне волокно;

ОЛТ – оптичний лінійний тракт;

ОП – оптичний підсилювач;

ОПер – оптичний передавач;

ОПр – оптичний приймач;

ОР – оптичний регенератор;

ОС – обладнання спряження;

ОС – оптична система (2-ий розділ);

ОФ – оптичний фільтр;

ОФБС – обладнання формування багатоканального сигналу;

РГЗ – різниці групових затримок;

УП – управління оптичною системою;

ФП – фотоприймач;

ФСМ – фазова самомодуляція.

## ВСТУП

Як відомо, найвагомішим досягненням у розвитку сучасних телекомунікаційних мереж та систем стало впровадження та експлуатація волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Основою сучасних ВОЛЗ є волоконно-оптичні кабелі (ВОК), параметри передачі яких визначаються оптичними волокнами (ОВ), що використовуються в них в якості середовища передачі інформаційних потоків. Саме ОВ визначають найважливіші переваги ВОЛЗ, такі як: висока швидкість передачі інформаційних потоків, велика довжина безретрансляційної ділянки (до 150 - 200 км), висока завадозахищеність і низький рівень шумів, мале згасання світлового сигналу у ОВ, тощо. На цей якісно новий рівень техніку оптичного зв'язку підняли три основні фактори [1, 2].

По-перше, поліпшення прозорості матеріалів для створення ОВ, яке майже досягло своєї теоретичної межі. Цей якісний показник здійснює вплив на зменшення величини загасання і рівня шумів у волокні. Оптичне волокно, що на цей час випускається, має загасання порядку 0,3-0,4 дБ на робочій довжині хвилі 1,3 мкм і 0,15-0,25 дБ – на довжині хвилі 1,55 мкм у розрахунку на один кілометр. Малі втрати через загасання і невеликі дисперсійні втрати дають змогу будувати безретрансляційні ділянки протяжністю понад 100 км, а в найсучасніших технологіях на основі спектрального мультиплексування каналів (Wavelength Division Multiplexing, WDM) – навіть понад 200 км. Низький рівень шумів у ОВ надає змогу збільшити пропускну здатність шляхом передачі різної модуляції сигналів із малою надлишковістю коду [1, 2].

По-друге, це розробка і використання напівпровідникових інжекційних лазерів (НІЛ), що працюють у режимі безперервного випромінювання за кімнатної температури, без яких неможливо було б побудувати сучасні високошвидкісні ВОЛЗ. Основними перевагами НІЛ є вузька ширина спектра випромінювання (для одномодового лазера  $\Delta\lambda = 0,1 \div 0,4$  нм), мала інерційність, висока ефективність перетворення електричної енергії на когерентне випромінювання, гранична частота модуляції, яка становить близько  $10^{14}$  Гц, велика потужність випромінювання, дуже малі розміри, низьковольтне живлення, можливість переналаштування частоти [2].

Ширина спектра випромінювання лазера визначає величину хроматичної дисперсії в ОВ, інерційність випромінювача спричиняє спотворення оптичних імпульсів і міжсимвольну інтерференцію, потужність випромінювання впливає на дальність передачі оптичного сигналу, висока частота модуляції зумовлює широку смугу пропускання, що дає потенційну можливість передачі по одному ОВ потоку інформації зі швидкістю в декілька терабіт на секунду [2].

На цей час існуючі переваги ОВ у комбінації з перевагами, що надаються у разі застосування у ВОЛЗ НІЛ, створили передумови до появи високошвидкісних технологій, що дають змогу більш ефективно використовувати пропускну здатність оптичних волокон і значно збільшити протяжність безрегенерацийних ділянок зв'язку. Такі технології ґрунтуються на двох принципово різних підходах до передачі інформаційних потоків [3].

Перший підхід полягає у збільшенні швидкості передачі цифрової інформації, базуючись на застосуванні традиційного, і на цей час поки що найпоширенішого, часового ущільнення (мультиплексування) каналів (Time Division Multiplexing, TDM). Підхід TDM збільшує пропускну здатність ОВ за рахунок розподілу відрізків часу на більш короткі інтервали. В результаті з'являється можливість здійснити передачу за секунду більшої кількості інформації. Такий підхід реалізується в найпоширенішій на цей час транспортних технологіях, що орієнтовані на використання синхронних цифрових ієрархій (Synchronous Digital Hierarchy, SDH). Синхронний режим передачі передбачає, що сигнали, які передаються по ОВ, синхронізуються за допомогою відповідного зовнішнього синхронізуючого пристрою. В результаті інформаційні потоки незалежно поширюються за допомогою світлових сигналів у виділеному спектральному діапазоні таким чином, щоб кожен потік можна було легко ідентифікувати та вилучити для обробки або здійснення маршрутизації [3].

Другий підхід щодо підвищення ефективності передачі інформаційних потоків по оптичних лініях зв'язку, який відносно нещодавно стали впроваджувати і використовувати мережні провайдери, передбачає використання методу спектрального мультиплексування (WDM). Застосування цього методу дозволяє збільшити пропускну здатність вже прокладеного ОВ за рахунок того, що робить його багатоканальним. Тобто по одному волокну можуть незалежно передаватися інформаційні потоки по кількох спектрально розділених оптичних каналах. Важливо зауважити, що тут оптичний інтерфейс може бути незалежним як від швидкості передачі інформації, так і від формату або протоколу, за якими

був сформований той або інший вхідний інформаційний потік. Це дає змогу оператору без труднощів інтегрувати технології на базі WDM у мережі, що використовують будь-яке обладнання, і, крім того, вводити нове обладнання, яке використовує свій власний хвильовий канал незалежно від інших систем (фактично точно так, наче його під'єднали безпосередньо до окремого ОВ). У той же час у технологіях сімейства WDM низка світлових каналів мультиплексується так, що стає можливим їх одночасне підсилення та подальша передача підсиленого сигналу далі по одному загальному ОВ. Тим самим збільшується його пропускна здатність, істотно знижуються витрати, зменшується кількість регенераторів [3, 4].

Підхід на основі використання WDM є набагато перспективніший у порівнянні з SDH, тому що він дає змогу максимально повноцінно використовувати можливості ОВ, зокрема, значно збільшити пропускну здатність сучасних ВОЛЗ без додаткової інсталяції нових ВОК та без встановлення на кожне волокно нового обладнання, насамперед регенераційного. Також працювати з декількома каналами в одному ОВ є набагато зручнішим, ніж з кількома волокнами, адже для обробки будь-якої кількості каналів у волокні потрібен лише один мультиплексор/демультиплексор WDM і відповідна до відстані кількість оптичних підсилювачів (ОП) [3].

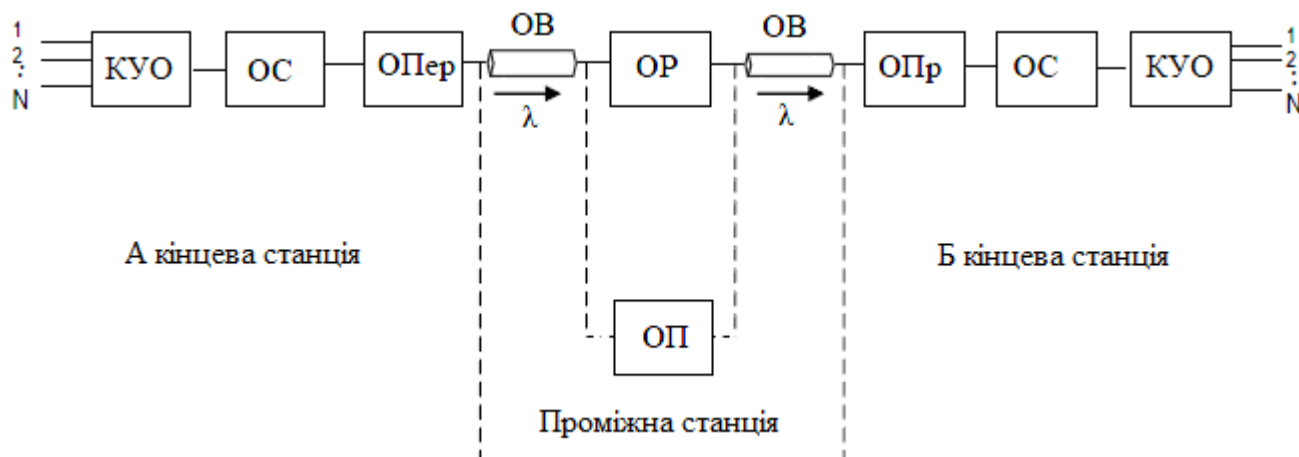
Проте необхідно зазначити, що однією з основних вимог, що висуваються до реалізації і функціонування ВОЛЗ з використанням будь-якої технології є забезпечення високих показників стабільності, готовності і надійності, тому що при передачі сигналів по оптичним лініям зв'язку виникають втрати і спотворення. Серед основних причин виникнення цих процесів, що призводять до погіршення якості зв'язку, є перш за все параметри ОВ та можливі неоднорідності в них, точки з'єднання з апаратурою передачі/прийому та регенерації, місця спряження різних кабелів та зварювальні з'єднання. У таких випадках для гарантування надійної роботи ВОЛЗ на перший план виходять задачі забезпечення проведення систематичних вимірювань і централізованого моніторингу параметрів ОВ і компонентів ВОЛЗ. Для забезпечення вирішення цих задач потрібно передбачити організацію ефективної системи контролю і моніторингу, в якій як раз і мають бути реалізовані відповідні методи вимірювань, як безпосередньо параметрів ОВ, так і показників надійності оптичних ліній, а також методика оцінювання результатів цих вимірювань [5, 6].

При цьому такого типу системи контролю і моніторингу мають бути передбачені як на етапах планування і проектування ВОЛЗ, так і в процесі її експлуатації. Особливо це є актуальною задачею для сучасних високошвидкісних ВОЛЗ на основі технологій сімейства WDM, оскільки в них усі параметри, що впливають на ефективність і цілісність передачі, потрібно вимірювати для кожного канального інтервалу на відповідній йому довжині хвилі. Це є достатньо складною задачею, особливо у разі щільного розташування хвильових канальних інтервалів. Також необхідно забезпечити постійний і безперервний моніторинг на всіх цих довжинах хвиль канальних інтервалів як окремі компоненти, так і всю систему ВОЛЗ в цілому. Також треба зазначити, що вибір вимірювального обладнання здійснюється, виходячи зі складності компонентів, параметри яких вимірюються, типу системи зв'язку і задач, що вирішуються, та передбачає спеціальну підготовку обслуговуючого персоналу мережного оператора [5, 7].

# 1 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Спрощена структурна схема типової ВОЛЗ та її компоненти

Унікальні переваги, наявність можливостей передавати на великі відстані сигнали в широкій смузі частот, постійно зростаючі потреби у підвищенні пропускної здатності телекомунікаційних мереж і систем зв'язку, потреба у забезпеченні якості у наданні сучасних послуг і багато іншого – зумовили необхідність повсюдного впровадження і переходу на оптичні лінії зв'язку. Спрощена структурна схема типової ВОЛЗ показана на рис. 1.1 [8].



КУО – каналотворююче обладнання;	ОР – оптичний регенератор;
ОС – обладнання спряження;	ОП – оптичний підсилювач;
ОПер – оптичний передавач;	ОПр – оптичний приймач.
ОВ – оптичне волокно;	

Рисунок 1.1 – Спрощена структурна схема типової ВОЛЗ

Сукупності КУО, ОС, ОПер та КУО, ОС, ОПр утворюють відповідно тракт передачі та прийому кінцевих станцій А і Б. У проміжних станціях встановлюються ОР та/або ОП. До оптичного лінійного тракту (ОЛТ), входять: ОПер, ОВ, ОР, ОП, ОПр [8].

Як бачимо на рис. 1.1. зі станції передачі первинні електричні сигнали  $\overline{1,2,\dots,N}$  надходять до КУО, яке забезпечує формування певної кількості типових каналів або типових групових трактів із стандартною для відповідної технології швидкістю передачі. З виходу КУО багатоканальний електричний сигнал подається до ОС, що необхідне для спряження параметрів багатоканального сигналу на виході КУО з параметрами ОПер. У ОС багатоканальний електричний сигнал перетворюється у форму, яка є необхідною для передачі по ОЛТ у відповідності з методом модуляції, що використовується (тобто формується лінійний сигнал) [8].

В ОПер електричний сигнал перетворюється на оптичний шляхом модуляції оптичної несучої. Далі цей сигнал передається в ОВ, причому він має бути введений у волокно із мінімальними втратами [8].

Головним елементом оптичного передавача є джерело випромінювання, в якості якого в сучасних високошвидкісних оптичних лініях зв'язку найбільшого поширення набули напівпровідникові інжекційні лазери (НІЛ). Важливим елементом лазерних систем (ЛС) є ланцюг струму накачки та система контролю температури. Для складних ЛС додають вихідний моніторинг оптичного сигналу. У ланцюзі струму накачки здійснюється перетворення напруги в струм. Це викликано тим, що в оптичній системі управління здійснюється струмом і, відповідно, опір джерела випромінювання такий, що якщо немає ланцюга струму накачки, то електричні перетворювачі можуть бути закорочені [8].

Під час поширення оптичного сигналу по ОВ відбувається його ослаблення і спотворення, що може призвести до обмеження максимальної довжини безретрансляційної ділянки волоконно-оптичного сегмента. З метою компенсації цих негативних явищ через певну відстань, залежно від ступеня спотворення сигналу, встановлюються регенератори та/або ОП [2, 8].

Регенератор складається з оптичного приймача, електричного підсилювача та оптичного передавача та виконує функції підсилення оптичного сигналу, відновлює форму імпульсів, зменшує рівень шумів та усуває помилки. Регенератор на вході спочатку перетворює оптичний сигнал в електричну форму, посилює, коригує, а потім на виході перетворює назад в оптичний сигнал [2, 8].

Оптичний підсилювач не робить оптоелектронного перетворення, як це здійснює регенератор. Він безпосередньо посилює оптичний сигнал, що проходить, завдяки індукованому випромінюванню, використовуючи при цьому

спеціальні активні середовища і лазери накачки. Таким чином, ОП не наділений функціями відновлення шпаруватості, у чому поступається регенератору. Однак є дві основні причини, які роблять застосування оптичних підсилювачів кращим. Зокрема якість сигналів, що передаються по ОВ, навіть якщо сегмент протяжний, залишається дуже високою внаслідок малої дисперсії та згасання. Також рівень внесених шумів через невразливість світловода до впливу електромагнітного випромінювання є невеликим. Тому передача даних, що просто просто підсилюються (без повної регенерації), є досить ефективною. Крім того ОП є більш універсальним пристроєм, оскільки на відміну від регенератора він не прив'язаний до стандарту і протоколу формування сигналу, що передається, або до певної частоти модуляції [2, 8].

На практиці на один регенератор може бути до 4-8 послідовно розташованих підсилювачів. Таким чином, їх ефективність використання у разі побудові протяжних ВОЛЗ дуже висока [2, 8].

На приймальній кінцевій станції Б здійснюється зворотне перетворення оптичного сигналу, прийнятого з ОВ, в електричний сигнал, далі здійснюється його регенерація і підсилення, потім сигнал відновлюється до вигляду первинного сигналу, що був на вході кінцевої станції А. Основним елементом ОПр є фотоприймач, який виготовляється зазвичай з напівпровідникового матеріалу. В його основі лежить явище внутрішнього фотоефекту. Електричний сигнал, що виходить від фотоприймача, посилюється каскадом електронних підсилювачів і за потреби оброблюється. Основні функції, які виконує ОПр на цьому етапі: електронне передпідсилення та підсилення, вирівнювання, фільтрація, дискримінація, синхронізація та робота таймера [2].

Зазначимо, що цифрофий ОПр повинен мати вузол прийняття рішення або дискримінатор, що має встановлені пороги на прийняття сигналів «0» і «1», який розпізнає, який сигнал прийшов, усуває шуми та відновлює необхідну амплітуду сигналу. Правильне виділення потрібного сигналу може відбуватися навіть у разі великого рівня шумів [2].

Обладнання спряження тракту прийому перетворює сигнал на виході ОПр в багатоканальний сигнал відповідного КУО. Каналоутворююче обладнання тракту прийому робить зворотні перетворення багатоканального сигналу в сигнали окремих типових каналів і трактів [8].

## 1.2 Загальні методи організації ОЛТ

Сучасні ВОЛЗ за методами організації ОЛТ поділяються на [8]:

- двоволоконні однокабельні одноканальні;
- одноволоконні одноканальні однокабельні;
- одноволоконні двоканальні однокабельні;
- одноволоконні багатоканальні однокабельні (системи WDM).

Розглянемо їх більш докладніше.

Необхідно звернути увагу, що у структурній схемі, яка наведена на рис. 1.1 реалізовано двоволоконний одноканальний однокабельний метод організації ОЛТ. Тут передача та прийом оптичних сигналів здійснюється по двох ОВ і на одній довжині хвилі, як показано на рис. 1.2 [8].

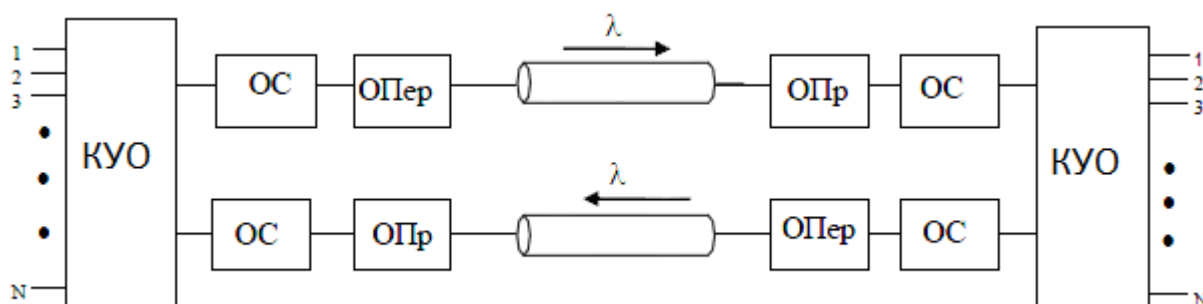


Рисунок 1.2 – Структурна схема ОЛТ двоволоконної одноканальної однокабельної ВОЛЗ

Кожне ОВ є еквівалентом двопровідного фізичного ланцюга і, оскільки взаємні впливу між ОВ кабелю практично відсутні, тракти передачі і прийому різних систем організуються по одному ВОК, тобто такі ВОЛЗ є однокабельними одноканальними [8].

До переваг цієї схеми організації ОЛТ слід віднести однотипність обладнання передачі та прийому кінцевих та проміжних станцій. Істотним недоліком є дуже малий коефіцієнт використання пропускної здатності волокна. Враховуючи, що частка витрат на кабельне обладнання становить значну частину вартості системи зв'язку, а ціни на ВОК є досить високими, то потрібно вирішувати проблему підвищення ефективності використання пропускної

здатності ОВ за рахунок здійснення одночасної передачі по ньому більшого обсягу інформації. Наприклад, це можна зробити за рахунок організації передачі інформації у зустрічних напрямках по одному ОВ [8].

Структурна схема організації одноволоконного одноканального однокабельного ОЛТ представлена на рис. 1.3. Особливістю цього методу є використання ОВ передачі сигналів у двох напрямках на одній довжині хвилі. Оптичний розв'язувальний пристрій (ОРП) здійснює поляризацію світлових хвиль або розділення типів хвилі оптичного випромінювання, що направляється [8].

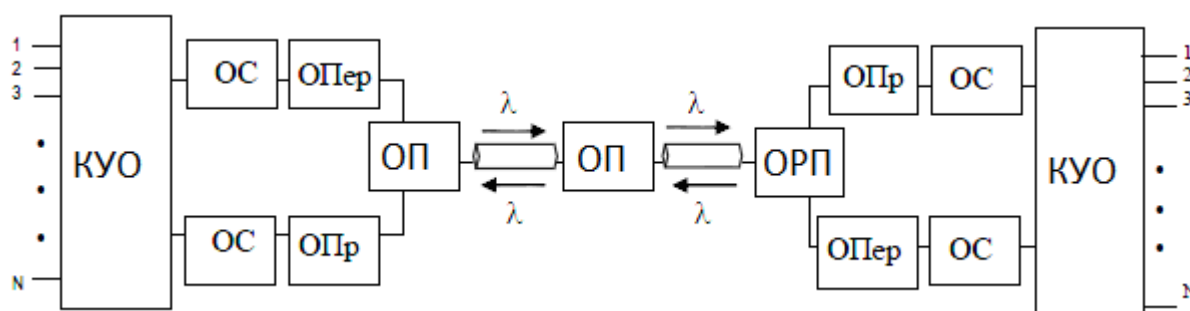


Рисунок 1.3 – Структурна схема ОЛТ одноволоконної одноканальної однокабельної ВОЛЗ

При передачі сигналів у двох напрямках виникають перехідні завади між потоками за рахунок зворотного розсіювання в ОВ та відгалужувачах, відбиття світла від зварних стиків та роз'ємних з'єднань на кінцях лінії. Рівень завади та її спектральний склад залежать від швидкості передачі, від форми імпульсів сигналу, що передається, і параметрів лінійного сигналу (загасання волокна, його довжини, числової апертури, профілю показника заломлення) [8].

При організації одноволоконного одноканального двоканального оптичного лінійного тракту ВОЛЗ передача в одному напрямку ведеться на довжині хвилі оптичного випромінювання  $\lambda_1$ , а в іншому –  $\lambda_2$ , як показано на рис. 1.4. Розділення напрямків передачі здійснюється за допомогою напрямних оптичних фільтрів (ОФ), які налаштовані на відповідні довжини хвиль оптичного випромінювання. У цій схемі ОФ $_{\lambda_{1,2}}$  являють собою напрямні оптичні фільтри, що здійснюють виділення відповідних довжин хвиль [8].

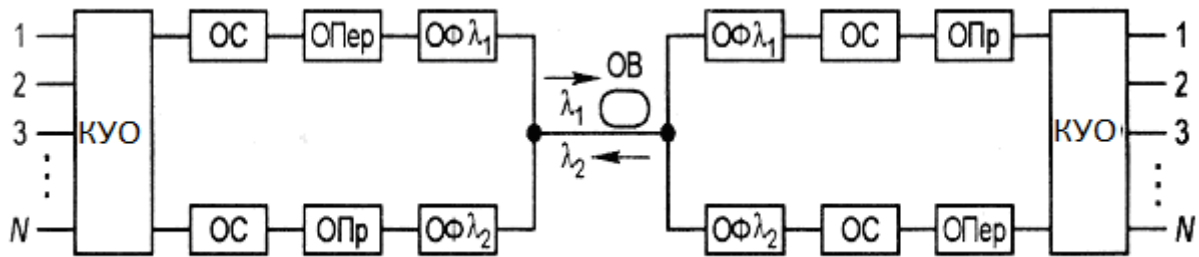


Рисунок 1.4 – Структурна схема ОЛТ одноволоконної двоканальної однокабельної ВОЛЗ

Треба звернути увагу на те, що такий принцип організації ОЛТ характерний для двохвильових систем WDM і на цей час вона найшла практичне застосується в основному для побудови ОЛТ передачі даних у пасивних оптичних мережах (Passive Optical Network, PON) [8].

У більш сучасних багатоканальних ВОЛЗ, наприклад, у ВОЛЗ на основі щільного спектрального мультиплексування (Dense WDM, DWDM) або розрідженого (грубого) спектрального мультиплексування (Coarse WDM, CWDM), застосовують одноволоконний багатоканальний однокабельний спосіб організації ОЛТ, де по одному ОВ одночасно передається декілька спектрально розділених оптичних несучих. Організація таких ВОЛЗ ґрунтується на порівняно слабкій залежності коефіцієнта загасання ВОК у межах спектрального діапазону, що використовується, від частоти (або довжини хвилі) оптичної несучої. Тому, якщо збільшити результуючу швидкість передачі по одному ОВ, – можна організувати кілька широкосмугових оптичних каналів. Структурна схема організації багатоканального одноволоконного однокабельного ОЛТ представлена на рис. 1.5 [8].

Зі сторони передачі є  $n$  систем передачі (однотипних або різнотипних), які представлені у вигляді обладнання формування багатоканального сигналу (ОФБС), що призначене для формування електричного сигналу, параметри якого узгоджені з оптичними передавачами і приймачами. У межах приведення до відповідності позначень, що використовуюються на рис. 1.2 - 1.4, ОФБС на рис. 1.5 являє собою сукупність КУО та ОС [8].

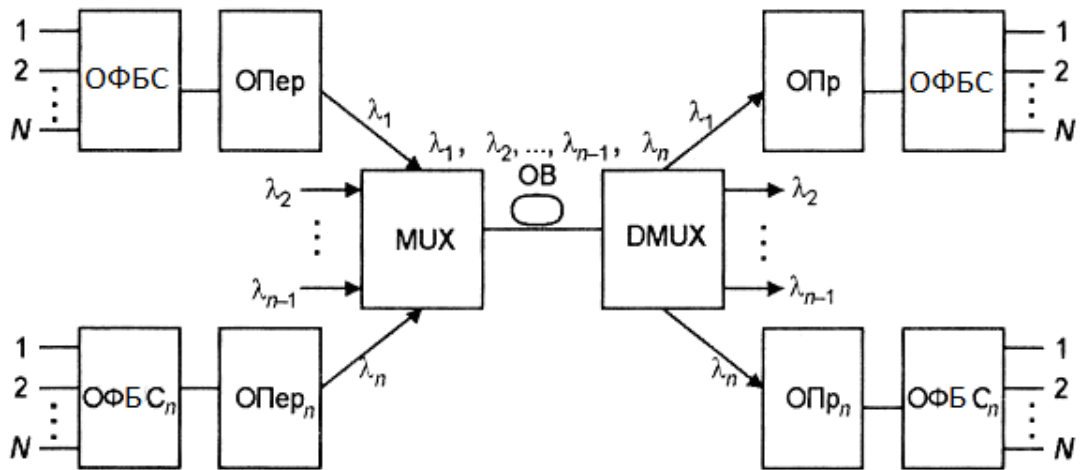


Рисунок 1.5 – Структурна схема ОЛТ одноволоконної багатоканальної однокабельної ВОЛЗ

Для об'єднання та розділення оптичних несучих каналів використовуються мультиплексори (MUX) та демультиплексори (DMUX). Їх робота заснована на явищах фізичної оптики: дисперсії, дифракції та інтерференції. В основі структури мультиплексорів та демультиплексорів може бути оптична призма, багатошаровий діелектрик, дифракційні ґратки, тощо. Сигнали з ОФБС подаються на  $n$  ОПер, що випромінюють різні оптичні несучі  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$ . З виходу ОПер ці оптичні несучі за допомогою MUX вводяться в ОВ, а на приймальній стороні за допомогою DMUX оптичні несучі розділяються та подаються на ОПр і далі на ОФБС. У підсумку по одному оптичному волокну організується  $n$  спектрально-розділених оптичних каналів, тобто коефіцієнт використання пропускну здатності ОВ збільшується в  $n$  разів у порівнянні із традиційною організацією ОЛТ [8].

### 1.3 Функціонально-технологічні особливості технологій сімейства WDM

Як можна бачити із стислого аналізу наведених вище методів організації ОЛТ у сучасних ВОЛЗ, найбільш перспективними є ті, які будуються на базі технологій WDM. Найбільш дешевий і простий спосіб використання WDM заснований на використанні стандартного одномодового волокна (Standard Single-mode Fiber, SSF), по якому передаються інформаційні потоки на довжинах хвиль 1310 нм та 1550 нм, тобто у другому та третьому вікнах прозорості (рис. 1.6) [4, 9].

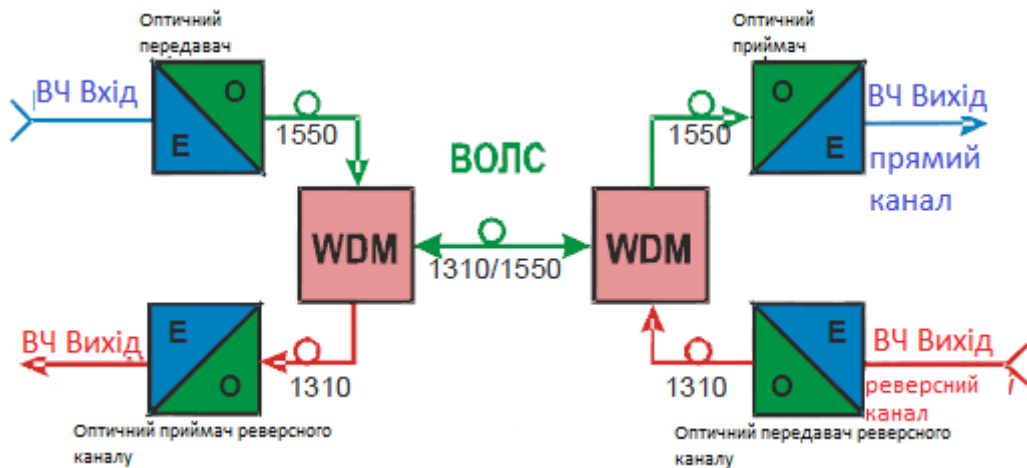


Рисунок 1.6 – Схема ВОЛЗ на базі двохвильової технології WDM

Практичний успіх 2-х хвильових WDM-систем обумовлений тим, що вони дозволяють подвоїти швидкість передачі сигналів по одному ОВ, або створити дуплексні системи на одному волокні, не роблячи зміни існуючого активного обладнання та використовуючи прості і надійні двохвильові MUX / DEMUX. Простота таких ВОЛЗ, обумовлена дуже великим спектральним інтервалом (понад 200 нм), але це обмежує подальше зростання їх пропускнуої здатності. Реально в таких двохвильових ВОЛЗ можна підключити ще тільки один канал на довжині хвилі 1650 нм або 1490 нм [4].

З появою ОП на основі волокон, що леговані рідкоземельними елементами ербію (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), стали розвиватися ВОЛЗ на основі технологій DWDM) та CWDM. Мультиплексування DWDM називається «щільним» через те, що в ньому використовується істотно менша відстань між довжинами хвиль, ніж WDM. На сьогодні у рекомендації ITU-T G.692 визначені [4, 9]:

- частотний план із рознесенням частот між сусідніми каналами 100 ГГц ( $\Delta\lambda = 0,8$  нм), відповідно до якого для передачі даних застосовується 41 хвиля в діапазоні від 1528,77 нм (196,1 ТГц) до 1560,61 нм (192,1 ТГц);

- частотний план з кроком 50 ГГц ( $\Delta\lambda = 0,4$  нм), що дозволяє передавати в цьому ж діапазоні 81 довжину хвилі.

- у розробці та експериментальній експлуатації знаходиться обладнання, що здатне працювати з частотними планами із кроком 25 ГГц ( $\Delta\lambda = 0,2$  нм), тобто для передачі даних є можливість застосувати біля 160 хвиль.

Спектральні області, в яких функціонують ВОЛЗ DWDM поблизу третього вікна прозорості, розбиті на три умовні спектральні діапазони (рис. 1.7) [9]:

- довгохвильовий діапазон L (Long, 1570 – 1625 нм);
- звичайний діапазон C (Conventional, 1530 – 1570 нм);
- короткохвильовий діапазон S (Short, 1460 – 1530 нм).

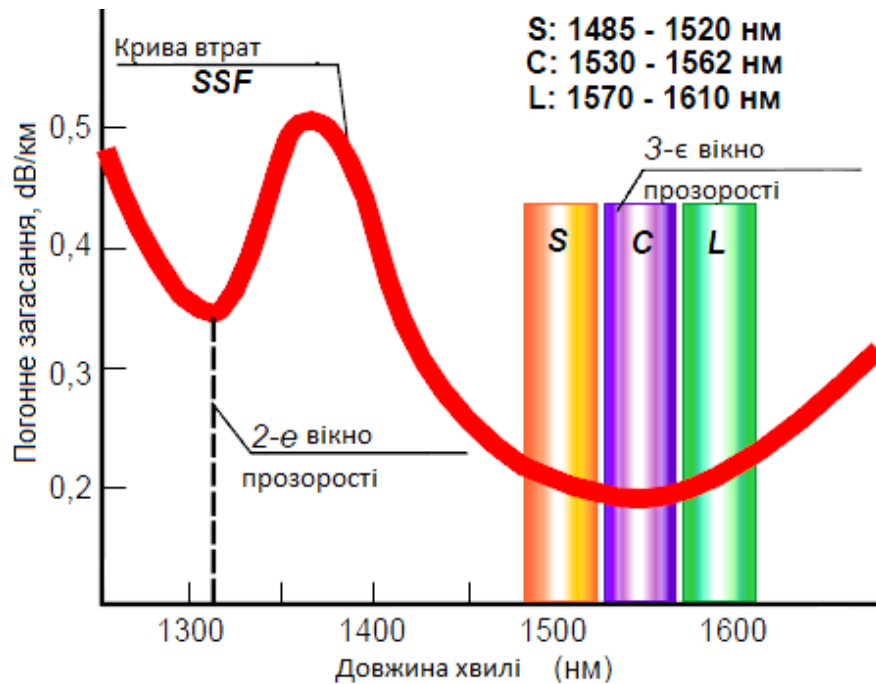


Рисунок 1.7 – Спектральні області в яких працюють ВОЛЗ на основі технології DWDM

Зазначимо, що рішення щодо застосування технології CWDM розглядаються як більш дешева заміна дорожчих систем DWDM у випадках, коли користувачам потрібно трохи більше 8 - 16 каналів WDM, наприклад, у разі організації транспортних магістралей обласного рівня або у великих містах. Крім того, мультиплексування CWDM/DWDM використовується тільки в третьому вікні прозорості (1550 нм), внаслідок чого воно може каскадуватися і з WDM мультиплексуванням (з боку 1550 нм) [9, 10].

З урахуванням вищевикладеного можна більш спрощено і наглядніше представити процес спектрального мультиплексування каналів (рис. 1.8) ніж це було показано на рис. 1.5. Одразу ж треба зазначити, що всі передавачі повинні працювати строго на своїй фіксованій довжині хвилі (частоті), що обумовлюється відповідним частотним планом (сіткою частот), які згадувалися вище у відповідності до рекомендації ITU-T G.692 [11].

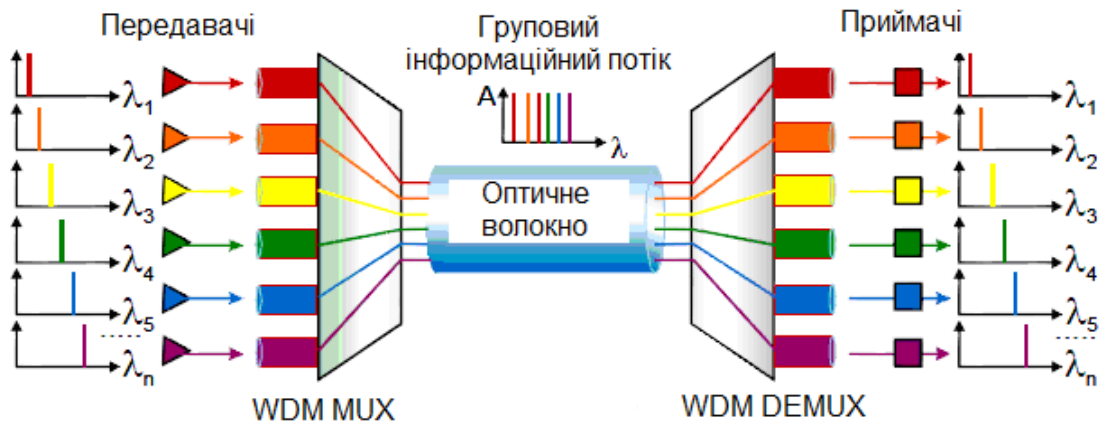


Рисунок 1.8 – Схема спрощеного подання WDM-мультиплексування

У досить великих і розгалужених ВОЛЗ на базі магістральних транспортних технологій DWDM є потреба у використанні мультиплексерів введення/виведення (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM), що дозволяють на певних довжинах хвиль формувати кінцеві пункти виведення інформації та введення нових цифрових потоків (рис. 1.9). Вузол з OADM організується на базі оптичного підсилювача, в який додається пасивна оптична плата, що дозволяє здійснити введення/виведення обмеженого числа оптичних каналів з фіксованими довжинами хвиль. Ця плата створюється на основі бреггівської ґратки з періодичними змінами індексу заломлення, що досягаються за рахунок насічок на оптоволоконному кабелі, зроблених за допомогою ультрафіолетового випромінювання. Одни MUX OADM на базі бреггівських ґраток дозволяє здійснювати введення/виведення від 1 до 12 оптичних каналів, а для інших каналів він буде функціонувати як ОП [11, 12].

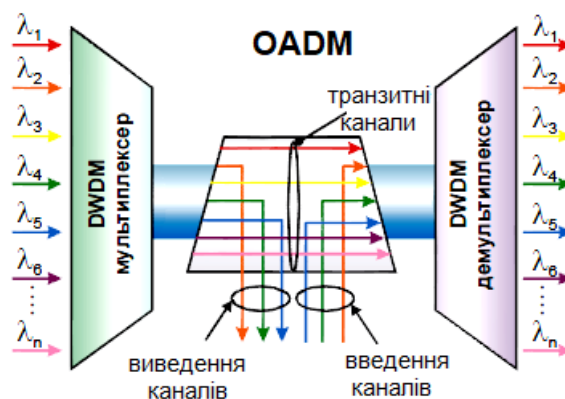


Рисунок 1.9 – Схема включення OADM у ВОЛЗ на основі DWDM

Підсумовуючи вищесказане, слід зазначити, що топологічні габарити ВОЛЗ на основі WDM, в основному обмежені такими факторами: числом оптичних вузлів, що припадають на один передавач, системним завантаженням (числом і видом каналів, що транслюються), загасанням сигналу у ВОЛЗ (включаючи втрати у пігтейлах і сплайсах), регламентацією якості сигналів, що транслюються (тобто нелінійними спотвореннями) [13].

#### 1.4 Основні типи спотворень, що впливають на передачу інформаційних потоків по каналах ВОЛЗ на базі WDM-технологій

##### 1) Самомодуляція фази оптичної несучої.

Показник заломлення ОВ залежить від інтенсивності оптичного сигналу, що призводить до залежності фази набігу від інтенсивності. Фазова самомодуляція (ФСМ) призводить до частотного зсуву на передньому і задньому фронті спектру імпульсу (рис. 1.10), оскільки в цих областях інтенсивність, а отже, і набіг фаз змінюються. У разі наявності дисперсії цей частотне зсув може призвести до звуження, розширення або іншого спотворення форми імпульсу [11].

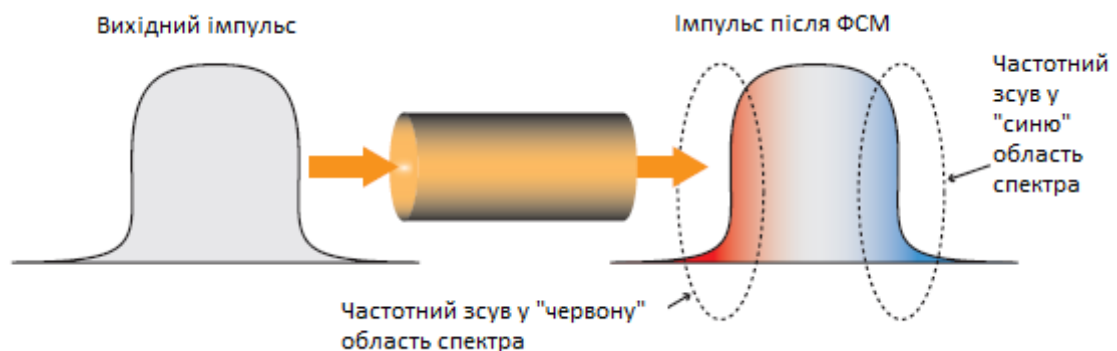


Рисунок 1.10 – Частотні зрушення на передньому та задньому фронтах імпульсу внаслідок ФСМ

##### 2) Поляризаційна модова дисперсія (Polarization Mode Dispersion, PMD).

В одномодовому волокні насправді поширюються дві моди з ортогональними поляризаціями. Ці поляризації називаються власними станами поляризації (ВСП). Наприклад, у волокні, що зберігає поляризацію, ВСП збігаються з осями двоприменезаломлення. У ОВ, по якому здійснюється

передача, двопронезаломлення змінюється складним чином під дією випадкових факторів (неідеальності кругової симетрії серцевини ОВ, мікросгинів, умов навколишнього середовища), тому напрями ВСП також випадковим чином змінюються вздовж волокна. Відмінність швидкостей поширення світлових імпульсів, що поляризовані уздовж швидкої та повільної вісей ВСП, тобто швидкостей двох поляризаційних мод, призводить до відставання однієї моди від іншої. Іншими словами, це призводить до появи різниці групових затримок (РГЗ) між модами (рис. 1.11) [11].

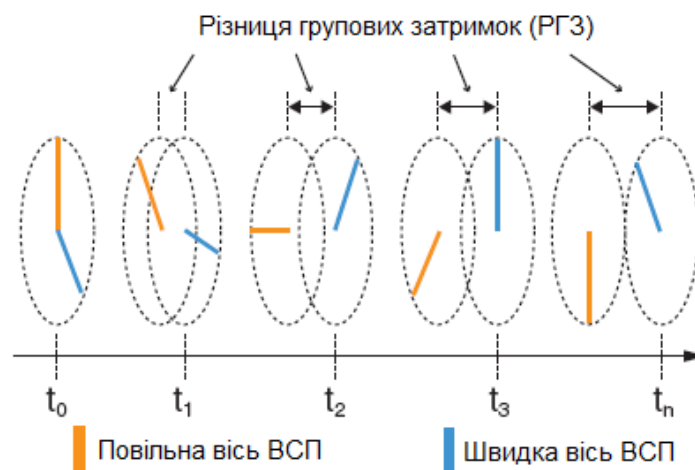


Рисунок 1.11 – Зміна напрямку ВСП уздовж ОВ

Усереднене значення РГЗ – це і є  $\text{PMD}$ , яка призводить до розширення імпульсу. У свою чергу, це підвищує ймовірність помилок при здійсненні розпізнаванні сигналу.  $\text{PMD}$  є основним фактором, що обмежує дальність передачі у вискошвидкісних ВОЛЗ (10 Гбіт/с та вище). Треба звернути увагу на те, що ефект  $\text{PMD}$  досить складно послабити, тому що умови навколишнього середовища, такі як температура, вібрації, тощо – тобто ті, що призводять до випадкових змін напрямку ВСП уздовж волокна, по якому здійснюється передача, самі випадковим чином з часом можуть змінюватися [11].

### 3) Хроматична дисперсія.

Хроматична дисперсія спричиняє розширення форми сигналу у разі його поширення по ОВ через різницю групових швидкостей його спектральних складових (рис. 1.12). Внесок у неї вносять дві її складових: матеріальна дисперсія та хвилеводна дисперсія. Дисперсія матеріалу виникає тому, що показник заломлення матеріалу волокна змінюється залежно від довжини хвилі оптичного

випромінювання. Хвильоводна дисперсія – це залежність затримки світлового імпульсу від довжини хвилі, що пов'язана із зміною швидкості його поширення у волокні через хвильоводний характер поширення. Через розширення сигналу, що спричиняє вплив хроматичної дисперсії у лінії, підвищується ймовірність виникнення помилок [11].

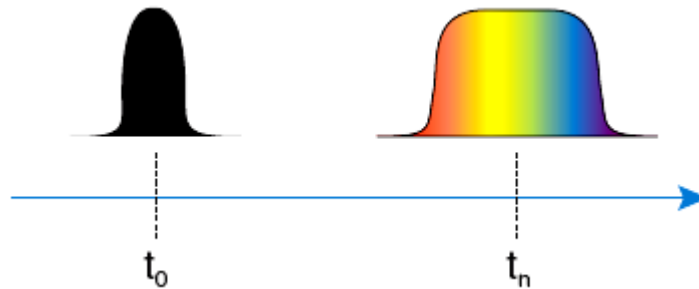


Рисунок 1.12 – Розширення імпульсу, що спричиняється хроматичною дисперсією

Дисперсійні властивості волокна залежить від його типу. У деяких волокнах більш короткі довжини хвиль можуть відставати від довших (це означає, що волокно має негативне значення дисперсії), в інших волокнах все може бути навпаки. Хроматичну дисперсію можна компенсувати, додаючи до лінії блоки компенсації дисперсії [9, 11].

#### 4) Чотирехвильове змішування (Four-Wave Mixing, FWM).

Взаємодія у сусідніх каналах WDM призводить до появи комбінаційних піків, які у свою чергу викликають перехресні завади у цих сусідніх каналах (рис. 1.13) [11].

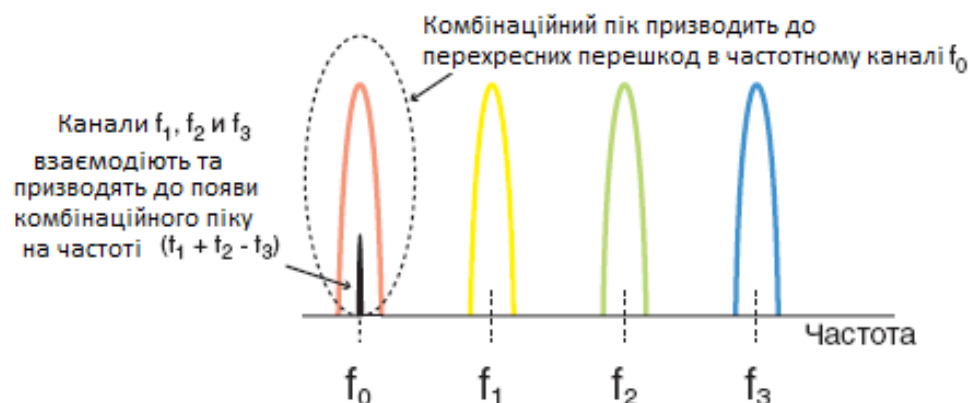


Рисунок 1.13 – Прояв ефекту FWM

При взаємодії каналів комбінаційні піки виникають на відстанях, що залежать від частоти цих каналів. У разі зменшення відстані між каналами ефект посилюється. Ефект FWM також може збільшитися у випадку підвищення потужності сигналу. Треба звернути увагу, що хроматична дисперсія у сигналі зменшує прояви ефекту FWM. Тому він найбільше проявляється поблизу нульової дисперсії волокна [11].

#### 5) Вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР).

ВКР (або ще його називають раманівським розсіювання) проявляється в переміщенні потужності від сигналу з меншою довжиною хвилі до сигналу з більшою довжиною хвилі (рис. 1.14). Взаємодія світлових хвиль із молекулами кварцу, що коливаються, призводить до їх розсіювання, під час якого енергія переміщується від однієї хвилі до іншої. Ефективність процесу збільшується із зростанням потужності та залежить від різниці частот і досягає максимального значення, якщо різниця частот становить 13,2 ТГц [11].

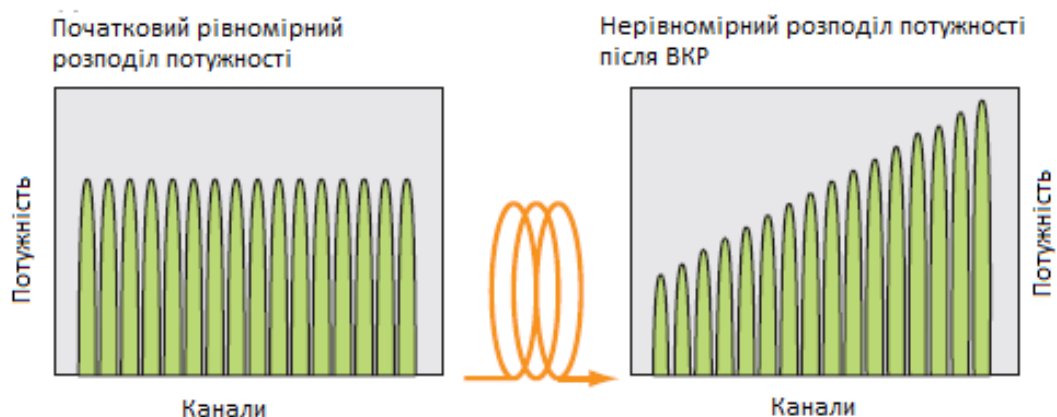


Рисунок 1.14 – Прояв ефекту ВКР

ВКР призводить до перехресних завад між каналами, і до нерівномірного розподілу потужності по частотному діапазону систем WDM, що є особливо важливим. Тобто на одному кінці частотного інтервалу канали посилюються більше, ніж це потрібно, а на іншому кінці – навпаки, швидше ослаблюються [11].

#### б) Перехресна модуляція фази.

Як відомо, показник заломлення волокна залежить від інтенсивності оптичного сигналу. При поширенні різних каналів по одному ОВ зміни показника

заломлення, що викликані світловою хвилею одного каналу, можуть створювати залежні від часу фазові зсуви у в сусідніх каналах. Фазові зсуви, що змінюються в часі, є рівносильними частотним зсувам, отже, у спектрі, що піддається дії ефекту перехресної модуляції фази, змінюється «колір». Ефект перехресної модуляції фази нагадує ефект фазової самомодуляції. За наявності дисперсії частотні зсуви можуть призводити до розширення чи іншого спотворення імпульсу [11].

## 2 АНАЛІЗ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ПРИНЦИПІВ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ У СУЧАСНИХ ВОЛЗ

### 2.1 Основні вимоги щодо забезпечення вимірювань, контролю та моніторингу параметрів оптичних волокон у сучасних високошвидкісних ВОЛЗ

Розвиток високошвидкісних ВОЛЗ різних типів та призначення, у тому числі і на основі технологій WDM, потребує проведення вимірювань низки параметрів, їх подальший контроль і моніторинг, що, у свою чергу, формує основні вимоги до методологічних процесів такого типу. Вже зазначалося, що серед причин виникнення втрат у разі здійснення передачі інформації по ВОЛЗ є загасання сигналу, дисперсія, нелінійні спотворення, що обумовлені віддзеркаленнями компонентів в ОЛТ, обриви і старіння волокна в часі, та інші фактори, що зумовлюють необхідність постійного контролю стану оптичних ліній зв'язку у процесі експлуатації. Це потребує необхідності організації досить складних систем моніторингу ВОЛЗ і, як наслідок, вирішення безлічі задач, що стосуються перш за все організації моделювання та створення методологічних процесів проведення вимірювань оптичним часово-імпульсним рефлектометром (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR) протяжних ОЛТ транспортних ВОЛЗ [14].

Серед інших вимог щодо забезпечення моніторингу і вимірювання параметрів високошвидкісних ВОЛЗ різних типів можна віднести такі [14]:

- деталізація характеристик компонентної бази і каналів зв'язку стосовно робочої довжини хвилі, що в достатньому обсязі можна здійснити на основі аналізу оптичного спектра;

- постійний моніторинг і вимірювання середньої каналної потужності для встановлення особливостей і закономірностей щодо розподілу потужності у всій спектральній робочій області ОП, що використовуються в ОЛТ, тобто для проведення вимірювань «спектральної однорідності» оптичної потужності;

- проведення вимірювань відношення сигнал/шум, тому що це є найкращим показником рівня роботи оптичної лінії зв'язку. Зазначимо, що в лініях, які експлуатуються в системах WDM, такі вимірювання мають проводитися для кожного каналу. При цьому процес вимірювання шуму має спиратися на проведення вимірювань мінімального рівня шуму між каналами, тому що значення перехресних завад є дуже важливою характеристикою, що визначає

рівень небажаного сигналу (тобто сукупності шуму і завад від інших каналів) у смузі пропускання каналу, моніторинг якого проводиться;

- перед створенням ліній високошвидкісних ВОЛЗ потрібно забезпечити постійний моніторинг PMD, оскільки цей параметр може призвести до необхідності значного збільшення запасу потужності, а в ряді випадків і до неможливості досягнення необхідних якісних параметрів у каналах і лініях зв'язку ВОЛЗ.

Далі більш докладно проаналізуємо ці методологічні принципи моніторингу і вимірювання параметрів ВОЛЗ.

## 2.2 Аналіз методологічних принципів проведення вимірювань оптичного спектра

Під вимірюванням оптичного спектру мається на увазі проведення вимірювання оптичної потужності залежно від довжини хвилі. Такий тип вимірювань стає особливо важливим у зв'язку з широким розповсюдженням високошвидкісних ВОЛЗ на основі технологій сімейства WDM. Також аналіз оптичного спектру необхідний тому, що у ОВ виникає хроматична дисперсія, яка визначається шириною спектра джерела випромінювання. Хроматична дисперсія проявляється у збільшенні тривалості світлових імпульсів, що просуваються по ОВ, а це, у свою чергу, обмежує пропускну здатність і дальність передачі по лінії [14].

На рис. 2.1 показана узагальнена структура аналізатора оптичного спектру (Optical Spectrum Analyzer, OSA) У цій схемі вхідний сигнал у вигляді оптичного випромінювання, що досліджується, потрапляє через оптичну систему (ОС) до фотоприймача (ФП), а потім, після аналого-цифрового перетворення (АЦП), до системи управління ОС (УП), де відбувається обробка даних з подальшим відображенням результатів аналізу. Функції системи УП можуть виконуватися комп'ютером, причому алгоритми управління та обробки даних визначаються конкретно системою OSA, що безпосередньо застосовується на лінії для проведення вимірювань [14, 15].

Проаналізуємо основні методологічні принципи організації та функціонування таких аналізаторів спектру, а також приклади їх застосування для проведення вимірювань у ВОЛЗ.

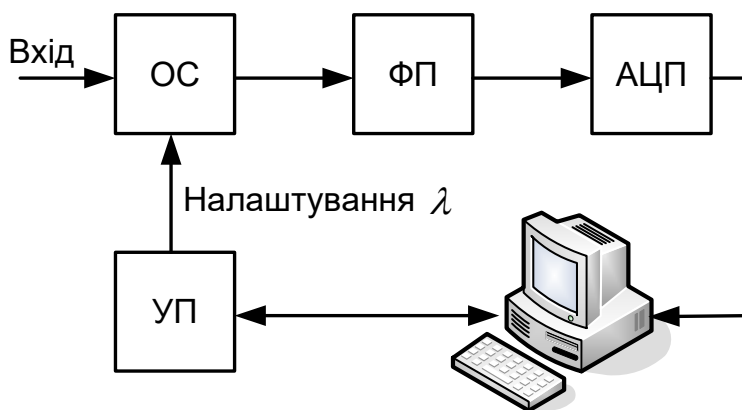


Рисунок 2.1 – Узагальнена структура OSA

Загалом принцип роботи OSA ґрунтується на основі застосування оптичних фільтрів, що можуть перелаштовуватися за довжиною хвилі. Цей принцип передбачає просторове розділення вхідного випромінювання на спектральні складові, які згодом перетворюються за допомогою фотодіода в електричний струм, який є пропорційним до потужності відповідної довжини хвилі. Цей електричний струм за допомогою підсилювача напруги, управління яким здійснюється струмом, перетворюється в аналогову напругу, а потім в цифрову форму після проходження АЦП. Усю подальшу обробку сигналу (наприклад, коригування), виконують у цифровому вигляді з відображенням значень потужності за вертикальною віссю зі швидкістю розгортки, що визначена наростанням лінійної напруги, яка змінюється контролером пристрою відображення. Цей контролер налаштовує оптичний фільтр у такий спосіб, щоб його центральна довжина хвилі була пропорційною середині горизонтальної вісі. У зв'язку з цим зображується ширина, наприклад, кожної моди лазера є функцією спектральної роздільної здатності оптичного фільтра, що налаштований на відповідну довжину хвилі [14].

На рис. 2.2 показана спрощена структура OSA на основі інтерферометра Фабрі-Перо (ІФП), що виконує функції оптичного фільтра і складається з двох високовідбивних паралельних дзеркал, які формують об'ємний резонатор, що здійснює фільтрацію вхідного оптичного випромінювання. Роздільна здатність OSA, побудованих на такого типу ІФП, головним чином залежить від коефіцієнта відбиття дзеркал і відстані між ними, тому налаштування довжини хвилі OSA відбувається або регулюванням відстані між дзеркалами, або нахилом самого інтерферометра відносно вхідного променя [14].

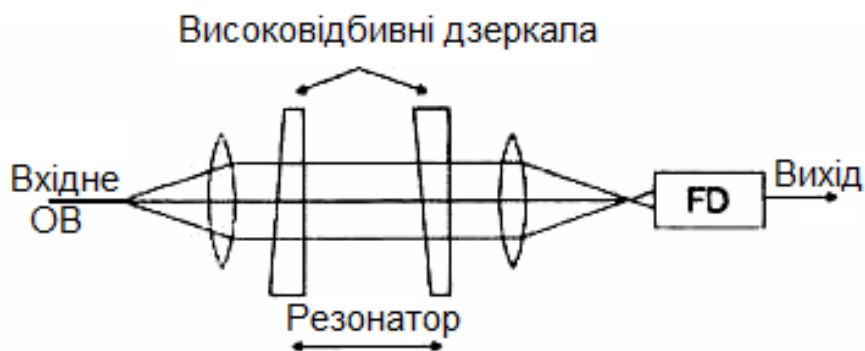


Рисунок 2.2 – Спрощена структура OSA на основі ІФП

Застосування ІФП в OSA зумовлено простотою конструкції та наявними в ньому можливостями, які дають змогу реалізувати надзвичайно високу спектральну роздільну здатність, забезпечуючи, наприклад, вимірювання спектра лазерних імпульсів із лінійною частотною модуляцією. Основним недоліком цих пристроїв є наявність так званих порожніх (мертвих) спектральних діапазонів, що є наслідком конструктивних особливостей аналізатора. Зокрема вони полягають у тому, що дзеркала необхідно розташовувати дуже далеко один від одного для отримання найвищої роздільної здатності, а це у свою чергу призводить до звуження спектрального діапазону OSA. Як правило, ця проблема, вирішується введенням другого фільтра, характеристики якого надають змогу виконувати фільтрацію довжин хвиль за межами першого спектрального діапазону [14].

Класичний ІФП являє собою настроюваний оптичний резонатор із двома паралельними відбивачами (частково-відбиваючими дзеркалами), у якому дзеркала для зменшення ширини смуги пропускання виконуються високовідбиваючими і виготовляються на основі багат шарових діелектричних покриттів, що наносяться на кварцову основу. У такому ІФП всі промені, які є зазвичай перпендикулярними до дзеркальних поверхонь, розглядаються з урахуванням припущення їх нахилу, а для визначення характеристик інтерферометра використовують метод, що базується на обчисленні кожного з множинних відбиттів сигналу резонатора. Після проходження резонатора світловими хвилями реєструється їх збіг за допомогою фотодетектора (FD). Унаслідок такого поєднання виникають биття, які виявляються завдяки струму фотодіода, що містить інформацію як про амплітуду, так і про фазу поля сигналу [14].

### 2.3 Аналіз методологічних принципів проведення моніторингу і вимірювань оптичної потужності

Одним з основних параметрів будь якої ВОЛЗ є оптична потужність. Моніторинг і вимірювання цього параметра є неперервним процесом та проводиться в обов'язковому порядку для встановлення стану ВОК і лінії в цілому. Результати вимірювань відображають у дБм або Вт. Розрізняють методологічні процеси проведення вимірювань абсолютної та відносної потужності. Вимірювання абсолютної потужності застосовується для визначення характеристик джерел і приймачів оптичних сигналів, а вимірювання відносної потужності – для визначення загасання, підсилення, зворотних втрат і втрат, що вносяться в оптичну систему. Так вимірювання абсолютної потужності в оптичних системах, наприклад, потужності ОПер або чутливості ОП, дає змогу визначити запас потужності, а вимірювання відносної потужності дає змогу оцінити рівень втрат світловода, коефіцієнт підсилення ОП, тощо [14, 16].

Можна виділити дві основні групи вимірювачів оптичної потужності [16]:

- вимірювачі потужності з термофотодетектором (TFD), у яких вимірюється перевищення температури, яке зумовлене оптичним випромінюванням;
- вимірювачі потужності з фотодетектором (FD), у яких фотони оптичного випромінювання генерують зв'язані пари «електрон-дірка».

На цей час є різні методологічні принципи вимірювання оптичної потужності за допомогою TFD. Найбільш поширеним є принцип, що ґрунтується на радіометричному методі заміщення, який по суті є методом автокалібрування. За цим методологічним принципом вимірювач потужності спочатку зазнає впливу оптичного випромінювання, а потім воно усувається (за допомогою шторки або преривача) і замінюється на потужність, що генерується електричним способом та яка контролюється так, щоб можна було підтримувати незалежну від часу температуру. Оскільки електрична потужність може бути виміряна з досить високою точністю, то це надає змогу забезпечити високу точність за цим принципом проведення вимірювання оптичної потужності. Практичне застосування цієї методології вимірювання полягає в наступному. На поглинаючий шар (наприклад, на поверхню, що має чорне покриття) спочатку здійснюють вплив падаючим світлом, а потім – нагрівачем, що термічно об'єднаний з поглинаючим шаром. Задня сторона нагрівача має ізольований шар срібла для урівнювання будь-яких можливих відхилень температури, а саме

срібло також пофарбовано чорною фарбою. Температура вимірюється за допомогою термобатарей, що являє собою послідовно з'єднані термоелементи, які розміщені в безпосередній близькості від срібної пластини та виробляють напругу, яке є пропорційним різниці температур між поглинаючим шаром і поверхнею досить великої теплової маси. Треба звернути увагу на те, що на меті є досягнення однакових температур для двох типів збудження, тому в цьому випадку питання лінійності не стоїть [16].

Також можлива інша реалізація цього методологічного принципу проведення вимірювання оптичної потужності, коли замість послідовного впливу оптичного випромінювання та електричної потужності термофотодіод (наприклад, це може бути тонкоплівковий датчик), постійно нагрівають електричною потужністю, що є дещо більшою, ніж оптична потужність, яка має бути виміряна. Для цього напругу TFD спершу реєструють за відсутності впливу оптичної потужності, потім на нього здійснюють вплив оптичною потужністю, а електрична потужність поступово зменшується через зворотний зв'язок до тих пір, поки напруга TFD стана такою ж, як і до впливу оптичної потужності. Необхідний результат проведеного вимірювання оптичної потужності є різницею значень електричної потужності між цими двома процедурами без додаткової потреби проводити вимірювання напруги TFD [16].

Найбільші труднощі у разі використання TFD полягають у їх низькій чутливості та великій тривалості процесу вимірювання (постійна часу від кількох секунд до кількох хвилин залежно від розміру TFD). Найкращі результати можливі у разі використання термочутливих елементів, які виконані з використанням напівпровідникових матеріалів [16].

Якщо порівнювати методологічні принципи, що засновані на застосуванні вимірювачів оптичної потужності на TFD, з вимірювачами на FD, то останні мають більшу перевагу, адже вони здатні вимірювати модульовану високочастотну потужність з рівнем, яка має значення менше ніж 1 пВт (-90 дБм). Завдяки високій чутливості, малій інерційності та простоті використання FD є найпоширенішим фоточутливим елементом. Виходячи з їх функціонального призначення, при застосуванні FD переважно користуються поняттям чутливості, оскільки внаслідок впливу на фотодіод оптичного випромінювання останній створює фотострум, значення якого пропорційне числу фотонів, а отже – оптичній потужності [16].

З погляду реалізації принципу вимірювання оптичної потужності із застосуванням вимірювачів на FD, в якості прикладу проаналізуємо процес вимірювання потужності випромінювання світлодіода (LED). Як відомо LED мають широкий спектр випромінювання, що у свою чергу зумовлює додаткову похибку, яка виникає через залежність чутливості FD від значення довжини хвилі потужності, що вимірюється. Однак зазначимо, що в деяких випадках, коли спектральний розподіл потужності випромінювання LED і наявна залежність спектральної чутливості FD є відомими, то таку похибку можна значно мінімізувати за рахунок запровадження відповідної корекції. Пропонується така процедура проведення вимірювання [17]:

- спочатку визначається центральна довжина хвилі світлодіода, наприклад, із існуючих паспортних характеристик;

- далі робиться налаштування вимірювача потужності на довжину хвилі світлодіода і Здійснюється вимір потужності випромінювання;

- якщо спектр випромінювання світлодіода є симетричним і залежність чутливості FD від довжини хвилі є майже лінійною в рамках спектра LED, то отриманий результат вимірювання потужності буде достатньо точним. Інакше, якщо одна з цих умов не буде виконана, то задля отримання точного значення потужності, згідно з вищевикладеним, потрібно визначити поправочний коефіцієнт, на який потім потрібно помножити отримане у процесі вимірювання значення потужності [17].

У разі необхідності проведення вимірювань оптичної потужності в обмеженому спектрі випромінювання можливе застосування оптичного фільтра (рис. 2.3). Наведена схема вимірювання дає змогу визначити і спектральну потужність випромінювання в заданому діапазоні довжин хвиль [17].

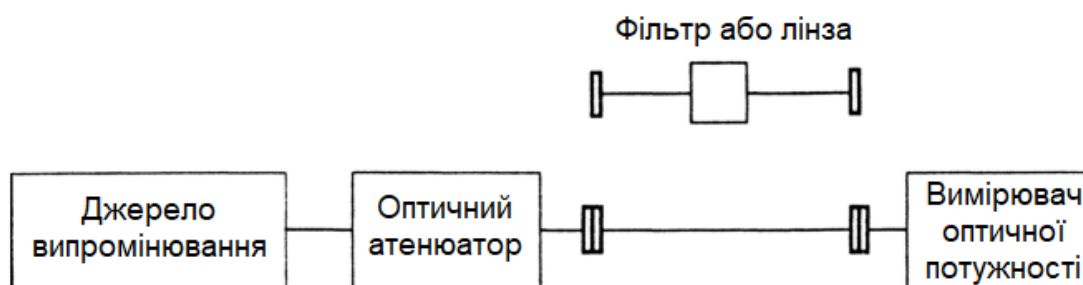


Рисунок 2.3 – Схема вимірювання оптичної потужності з оптичним фільтром

## 2.4 Аналіз методологічних принципів проведення моніторингу і вимірювань відношення сигнал/шум

Основним системним параметром, що визначає якісні характеристики цифрових систем передачі, є достовірність переданої інформації. Достовірність виражається через визначення імовірності або коефіцієнта бітових помилок  $P_{ном}$  у процесі передачі певної кількості символів або біт (Bit Error Rate, BER). Так для вимірювання BER у системах передачі PDH і SDH були розроблені відповідні вимірювачі коефіцієнта помилок. За таким алгоритмом працює, наприклад, аналізатор цифрових сигналів PDH і SDH ANT-20 АСТЕРНА [18].

Для ВОЛЗ на основі WDM вимірювання за зазначеним критерієм BER повинні проводитися для кожного канального інтервалу. Проведення таких вимірювань займає значний час: від десятків хвилин до кількох годин, - залежно від швидкості передачі в одному каналі. Звідси випливає, що якщо ВОЛЗ побудована на оптичних лініях WDM з числом каналів від 16 до 160, то проведення вимірювань з позиції часових факторів буде є абсолютно неприйнятним. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано використання функціональної залежності виду [19]:

$$P_{ном} = f\left(\frac{C}{Ш}\right),$$

– де коефіцієнт помилки є функцією відношення потужності сигналу до потужності шуму. Для цифрових каналів такою функцією є функція Крампа, для якої існують відповідні таблиці [20].

Вимірювання сигнал/шум проводять за схемою, що зображена на рис. 2.4. Як видно з цієї схеми, пристрій вимірювання відношення сигнал/шум містить наступні компоненти [20]:

- двонапівперіодний безінерційний детектор з характеристикою  $y = a|x|$ , який здійснює перетворення неперервного спектру випадкової послідовності імпульсів;
- вузькосмуговий фільтр, який виділяє першу гармоніку з дискретної складової перетвореного спектру сигналу;
- двоквадратичні інерційні детектори із характеристиками  $y = ax^2$ , один із яких здійснює випрямлення синусоїдальної напруги першої гармоніки,

пропорційної до сигналу, а другий - робить суму сигналу і шуму в смузі частот лінійного тракту фотодетектора.

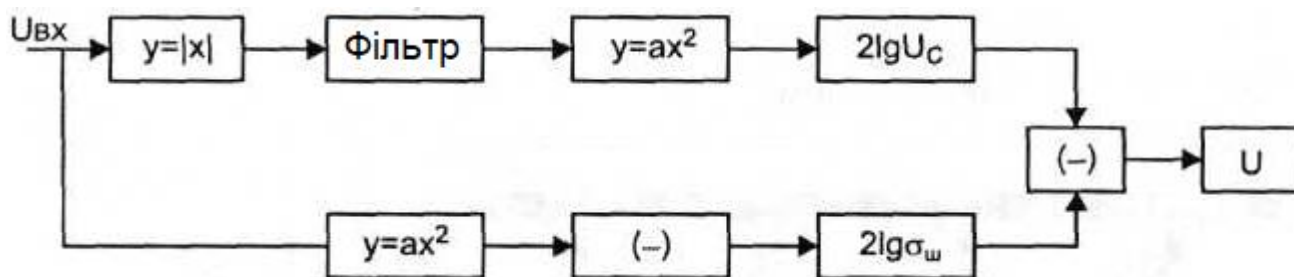


Рисунок 2.4 – Схема проведення автоматичного вимірювання відношення сигнал/шум

Напруги, що були отримані, віднімаються за допомогою схеми різниці (-), вихідна напруга якої однозначно зв'язана з квадратом напруги шуму на виході лінійного підсилювача фотодетектора. Ця напруга, а також напруга з виходу квадратичного детектора, що здійснює випрямлення першої гармоніки у вузькій смузі частот, далі подаються на логарифмувальні пристрої з характеристиками  $2\lg \sigma_{ш}$ . Вихідні напруги з виходів логарифмувальних пристроїв віднімаються за допомогою другої схеми різниці, вихідна напруга якої однозначно пов'язана з відношенням  $P_c/P_{ш}$  на виході фотодетектора. У свою чергу, це відношення лінійно зв'язане з відношенням оптичної потужності сигналу до потужності оптичного шуму (Optical Signal-to-Noise-Ratio, OSNR) на вході фотодетектора (за умови малості темнового струму фотодетектора і теплових шумів, що зазвичай в оптичних лініях зв'язку дотримується). Цей однозначний зв'язок дає змогу проградувати показання приладу в значеннях відношення  $U_c/U_{ш}$  ( $P_c/P_{ш}$ ) у децибелах і проводити вимірювання цього параметра без переривання зв'язку [20].

## 2.5 Аналіз методологічних принципів проведення моніторингу PMD

Як зазначалося, у одномодовому волокні швидкість поширення світла залежить від поляризації, тобто у ОВ робочу довжину хвилі можна представити у вигляді двох мод з ортогональними поляризаціями. Через порушення ідеальної кругової симетрії серцевини волокна, мікро- або макровигинів, умов

навколишнього середовища, тощо – у волокні виникає невелика анізотропія або двоприменезаломлення. При цьому дві ортогонально поляризовані моди у ОВ будуть поширюватися з різними фазовими і груповими швидкостями. Як наслідок, у волокні утворюються «швидка» (Fast) і «повільна» (Slow) вісі, вздовж яких моди ортогональної поляризації поширюються з різною швидкістю [11, 21].

Відмінність цих швидкостей призводить до відставання імпульсу, що поляризований уздовж повільної вісі двоприменезаломлення від імпульсу, що поляризований уздовж швидкої вісі двоприменезаломлення на величину РГЗ, яка і визначає величину PMD (рис. 2.5) [21].

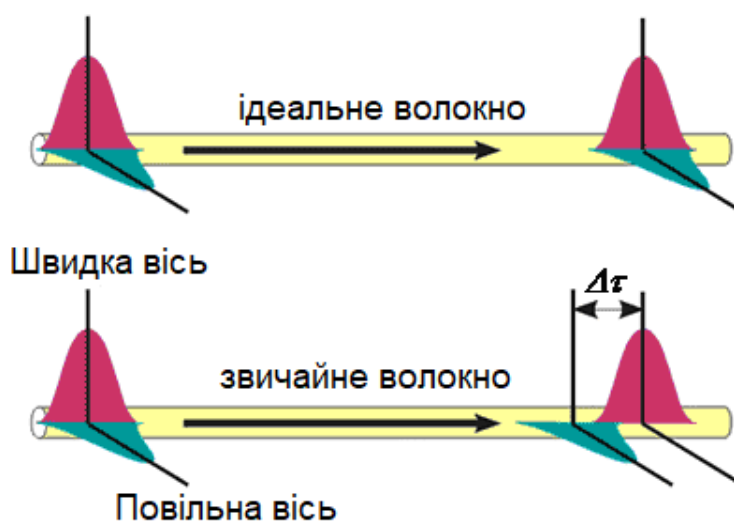


Рисунок 2.5 – Поява групової затримки між модами двох станів поляризації у ОВ

Виділяють два основних методологічні принципи, на яких ґрунтується визначення PMD – це хвильовий (частотний) та часовий методи, що полягають у вимірі PMD по середній диференціальній груповій затримці та середньоквадратичному відхиленні інтервалів часу [22].

Прикладом хвильового методологічного принципу вимірювання PMD є метод вимірювання шляхом сканування довжини хвилі. Відповідно з ним для вимірювання PMD середнє значення диференціальної групової затримки визначається статистично, виходячи з кількості максимальних та мінімальних значень потужності на виході аналізатора по мірі сканування довжини хвилі.

Хоча відхилення вихідної поляризації у разі використання волокна з довільно зв'язаними модами є нестійким на будь-якій довжині хвилі, існує два основних стани поляризації, у разі невеликих відхиленнях від яких вихідна

поляризація змінюватиметься в досить малому інтервалі довжини хвилі. На цьому ґрунтується кілька альтернативних конфігурацій вимірювання PMD шляхом сканування довжини хвилі, що наведені на рис. 2.6 та 2.7 [22].

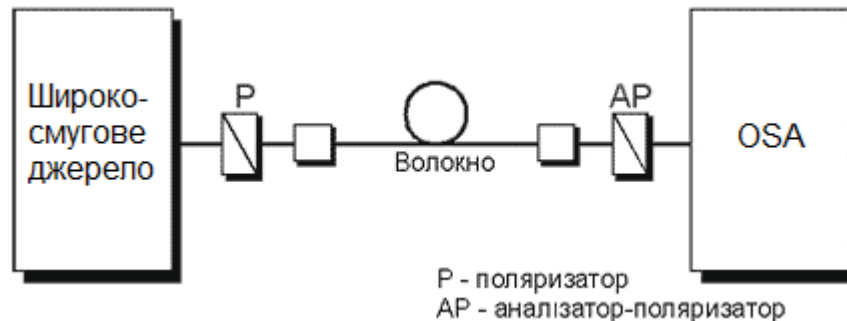


Рисунок 2.6 – Схема проведення вимірювання PMD з використанням OSA

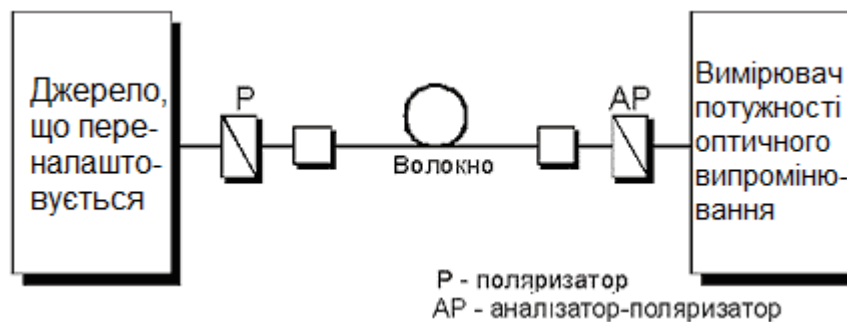


Рисунок 2.7 – Схема проведення вимірювання PMD вимірювачем потужності

Ці схеми відрізняються типом джерела випромінювання, а також засобами визначення ширини спектру і налаштування довжини хвилі. Для забезпечення адекватного визначення характеристик спектральна роздільна здатність схеми має задовольняти вимозі [14]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} < \frac{1}{8\nu\Delta\tau},$$

де  $\Delta\lambda$  – спектральна ширина джерела, або роздільна здатність смуги пропускання приймача, м;

$\lambda$  – номінальна довжина хвилі вимірювання, м;

$\nu$  – оптична частота, Гц;

$\Delta\tau$  – диференціальна групова затримка пристрою, що тестується, с.

Згідно з методом вимірювання шляхом сканування довжини хвилі, схеми якого показані на рис. 2.6 та 2.7 результати вимірювань накопичуються при скануванні або покрокових змінах довжини хвилі джерела (або приймача, в залежності від схеми проведення вимірювання). Для здійснення корекції залежності потужності джерела та втрат пристрою від довжини хвилі потрібно робити еталонне вимірювання, яке робиться з віддаленим аналізатором. В іншому випадку еталонне вимірювання може бути проведене при здійсненні повороту аналізатора на 90 градусів. Отримані у процесі вимірювань результати не будуть безпосередньо значенням PMD, тому їх треба піддати автоматизованій обробці, яка здійснюється перетворенням Фур'є. Оцінка вихідного сигналу стаціонарного аналізатора за допомогою аналізу Фур'є має перевагу в тому, що вона графічно відображає характеристики зв'язку мод зразка. Крім того, аналіз Фур'є дозволяє здійснювати фільтрацію високих частот, що викликані шумами або вібрацією, які можуть бути виявлені як максимальні та мінімальні значення у разі використання методу підрахунку екстремумів [14, 22].

Прикладом часового методологічного принципу вимірювання PMD є інтерферометричний метод, що заснований на вимірі автокореляції електричного поля світлової хвилі або взаємної когерентності двох сигналів, що випромінюються одним широкосмуговим джерелом. Тобто іншими словами цей метод ґрунтується на прямому вимірі часової затримки. Узагальнена схема вимірювання PMD на основі інтерферометра Майкельсона з встановленими на виході джерела оптичного випромінювання поляризатором, а на вході фотодетектора – аналізатором, наведена на рис. 2.8 [8, 22].

У цьому методі у ОВ, що досліджується, подається сигнал від широкосмугового джерела випромінювання, за яким йде поляризатор, або від LED, що випромінює світло певної лінійної поляризації. Сигнал, який переданий через ОВ, що тестується, аналізується за допомогою інтерферометра Майкельсона. В ньому світло від пересувного та фіксованого дзеркал накладається у площині детектора. Взаємний вплив виникає, коли довжина двох відгалужень відрізняється на величину, що буде меншою за когерентну довжину джерела, а максимальна видимість має місце, коли довжини каналів ідентичні. При цьому ширина відгуку зворотно пропорційна ширині спектра джерела, а амплітуда огинаючої фотоструму є функцією часової затримки, що створюється пересувним дзеркалом [8, 22].

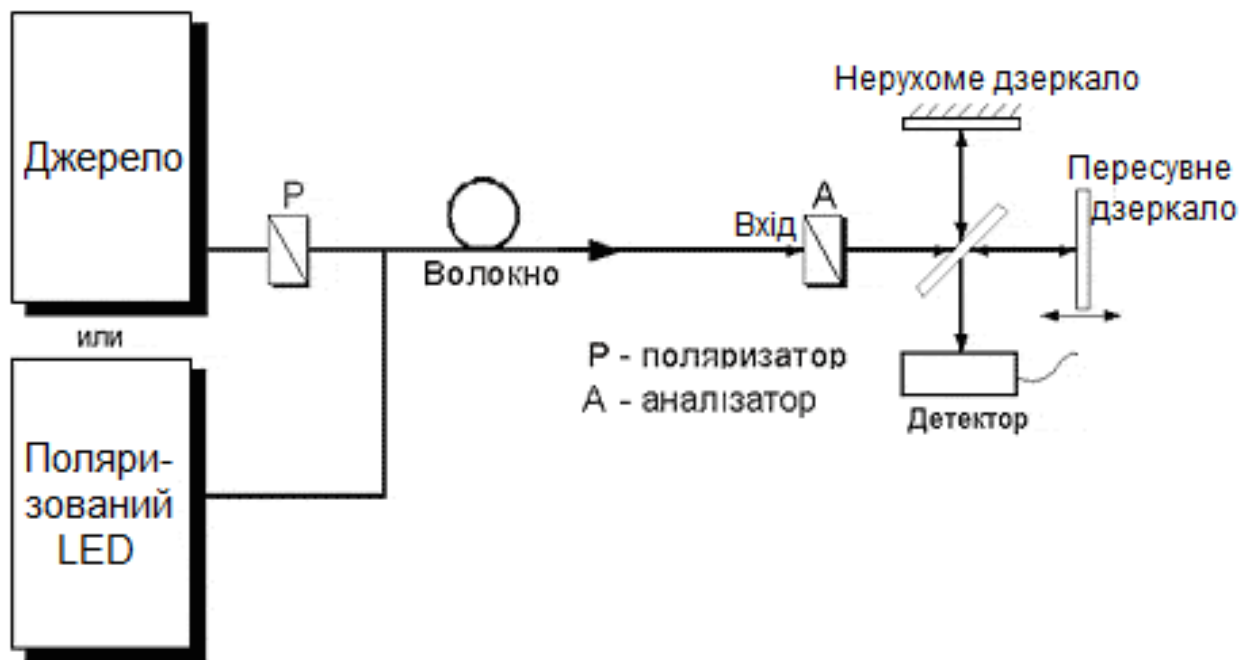


Рисунок 2.8 – Узагальнена схема проведення вимірювання PMD інтерферометричним методом

Інтерферометричний метод може бути застосований до волокон як із виродженими модами, так і до ОВ зі зв'язаними модами, де основні стани поляризації є функціями довжини хвилі. Проаналізуємо випадок, коли в пристрої, що тестується, відсутній зв'язок мод. У відповідності із рис. 2.8 цей пристрій розміщений в оптичному промені, тому обидві поляризації інтерферометра розпадаються на дві власні моди тестового пристрою. Відповідний відгук у разі пересування дзеркала має центральний пік, коли довжини каналів інтерферометра рівні, а також віддалені піки, коли пересувне дзеркало створює затримку, яка є рівною диференціальній груповій затримці пристрою, що тестується. Один віддалений пік створюється взаємодією між променем повільної моди, що бере початок в каналі фіксованого дзеркала, і світлом швидкої моди, що затримується пересувним дзеркалом. Інший віддалений пік створюється взаємодією між променем повільної моди, що бере початок у каналі фіксованого дзеркала, і світлом повільної моди, що виникає внаслідок ідентичного руху дзеркала в протилежному напрямку. Час між центральним та будь-яким з віддалених піків і є диференціальна групова затримка пристрою. Відносна інтенсивність піків залежить від відносної орієнтації пристрою та аналізатора [8, 22].

## 2.6 Аналіз методологічних принципів проведення вимірювань з використанням оптичних рефлектометрів та їх структурна реалізація

### 2.6.1 Загальні особливості проведення вимірювань із застосуванням оптичних рефлектометрів

Для забезпечення ефективної роботи високошвидкісних оптичних ліній зв'язку дуже важливим є можливість швидкого виявлення та ліквідація обривів ОВ, особливо у ВОЛЗ на основі WDM, оскільки тут обриви волокна можуть призвести до закриття великої кількості комунікаційних каналів. Також важливими є питання визначення величини ослаблення у волокні і втрат, які вносяться конекторами та іншими компонентами ВОЛЗ у разі прокладання нових сегментів ліній зв'язку. Із появою ОП та зростаючим їх застосуванням у ВОЛЗ, – довжина регенераційної ділянки постійно збільшується. Це зумовлює необхідність систематичного проведення автоматизованого дистанційного моніторингу та виявлення несправностей ВОЛЗ. В основі вирішення цих задач лежить використання оптичних рефлектометрів (OTDR) [14].

Як відомо, методологічний принцип проведення вимірювань із застосуванням OTDR заснований на введенні у волокно імпульсного оптичного випромінювання і подальшому аналізі тієї малої частини світлового потоку, яка повертається на фотодіод в результаті зворотного розсіювання і відбиттів світлової хвилі, що поширюється в волокні. В результаті математичної обробки сигналу фотодіода на екрані OTDR формується зображення у вигляді графіку, яке носить назву рефлектограми (рис. 2.9), що є залежністю рівня цього сигналу від відстані уздовж волокна. Вздовж вісі абсцис відкладено відстань, вздовж вісі ординат – рівень потужності сигналу. Загалом графік є спадаючим, тому що все, що є на оптичній лінії, вносить загасання в сигнал, що подається: різноманітні з'єднання, дефекти, і безпосередньо саме волокно теж має постійне загасання. Таким чином рефлектограма дозволяє визначити згасання і розрив волокна, втрати на компонентах лінії, наявність механічних впливів на ОВ, а також ряд інших дуже важливих характеристик ВОЛЗ [14, 23].

Як можна бачити із приклада рефлектограми на рис. 2.9 вона складається з мертвої зони на початку, робочої ділянки та області шумів у кінці лінії.

На самому початку йде пік зворотного відбиття від вхідного конектора і шлейф після нього - це так звана мертва зона. Вона є частиною лінії, моніторинг

якої здійснюється. Мертва зона не дає побачити ситуацію на початку лінії (тобто, чи гарне кросове з'єднання, чи гарне зварювання піг-тейла з кабелем, тощо). Повністю позбутися мертвої зони неможливо, однак, якщо вжити низку заходів, можна її зменшити або обійти, наприклад, знизити тривалість імпульсу, використовувати більш чутливий рефлектометр, використовувати компенсаційну котушку [23].

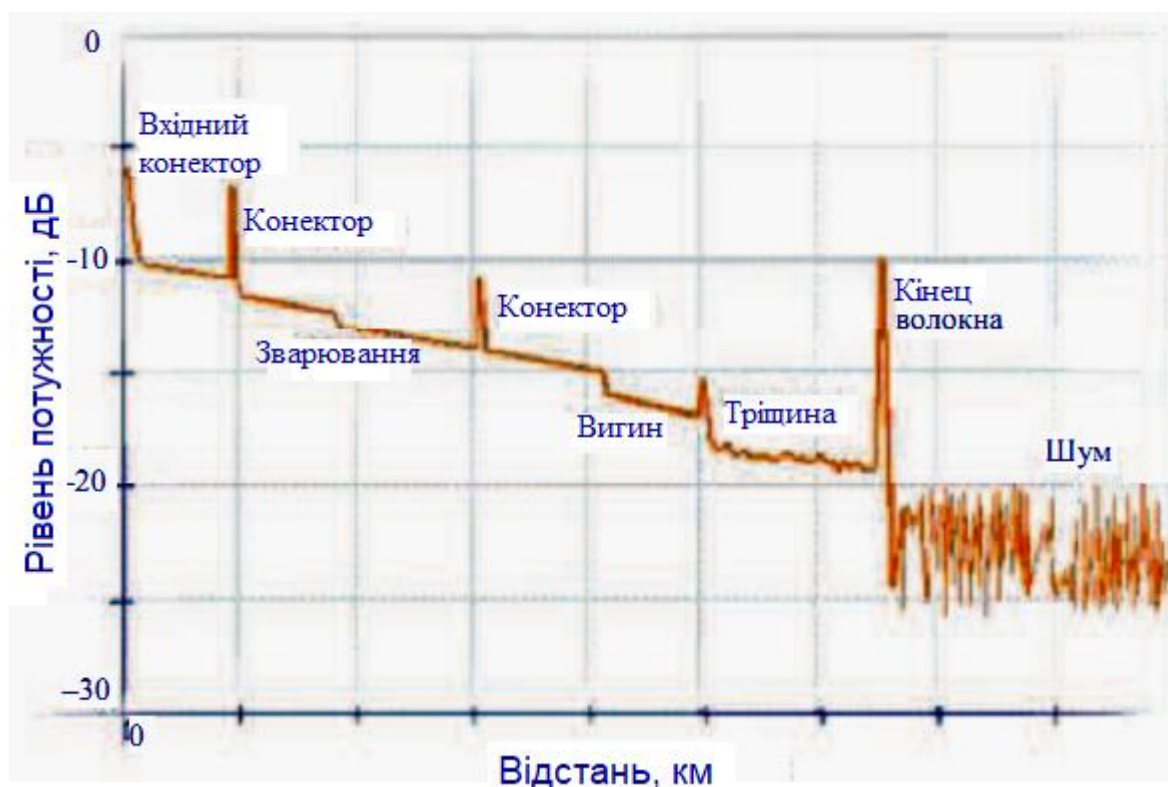


Рисунок 2.9 – Типова рефлектограма ОВ та її складові

У кінці лінії, після кінцевого піку – йде область шумів, яка не належить до лінії. Ділянка шумів може мати різний вигляд: як «частокіл» піків і провалів, або як рівна лінія вздовж нуля, тощо. Між мертвою зоною і шумами йде сама траса, тобто робоча ділянка. В ідеальному випадку (під час вимірювання цілісного шматка кабелю, без сварок і з'єднань) це пряма лінія. Вона має нахил (поступово рівномірно спадає), оскільки волокно вносить власне загасання (у «вікнах прозорості» одномодового волокна це не більше ніж 0,22 дБ/км на довжині хвилі 1550 нм і не більше ніж 0,36 дБ/км при довжині хвилі 1310 нм) [23].

Як показано на рис. 2.9, на робочій ділянці рефлектограми реальної лінії можна побачити [23]:

- зварювання, яке в більшості випадків виглядає як сходинка вниз. Чим більша сходинка, тим більше на ній загасання і, відповідно, тим гірше зварювання;

- механічне з'єднання (конектор), яке на рефлектограмі має вигляд досить сильного піку. Він виникає від того, що на механічному з'єднанні неминуче виникає зворотне відбиття. Рівень сигналу після піку зазвичай дещо падає, причому сильніше, ніж на зварному з'єднанні;

- вигин волокна. На рефлектограмі він має практично такий самий вигляд, як і для зварювання, але зварювання на обох довжинах хвиль буде давати приблизно однакові загасання, а вигина волокна під час вимірювання на 1310 нм буде або зовсім не видно, або видно слабко, а на 1550 нм може дати величину в кілька децибел. Саме так і визначають, що це вигин у касеті, а не погане зварювання;

- тріщина в ОВ. Її візуалізація на рефлектограмі схожа на конектор, але пік може бути як слабшим, так і набагато сильнішим, майже як у кінці траси;

- обрив або кінець траси - може мати вигляд як великого піка, так і маленького. До нього була рівна траса, після нього тільки шуми. Щоб зрозуміти, що це саме кінець траси, а не обрив - треба знати заздалегідь довжину лінії, моніторинг якої здійснюється.

Основною характеристикою приладів цього типу є динамічний діапазон, безпосередньо пов'язаний з дальністю виявлення неоднорідностей у волокні. На сьогоднішній день існують OTDR, що забезпечують динамічний діапазон 46 дБ, що дозволяє контролювати волокна понад 300 км на довжині хвилі 1625 нм [23].

## 2.6.2 Конструктивні особливості OTDR

Розглянемо загальну конструкцію пристроїв OTDR та принцип їх дії в процесі проведення вимірювань. Принцип його дії полягає у вимірі інтенсивності відбитих від неоднорідностей ОВ світлових хвиль, створюваних лазерним джерелом випромінювання, що працює в імпульсному режимі, і подальшому визначенні відстані до неоднорідності часу проходження світлового променя [14].

У більшості моделей OTDR використовується модульна конструкція (рис. 2.10). Вона містить базовий модуль та кілька змінних оптичних модулів. Базовий модуль – це фактично звичайний комп'ютером, який пристосований для обробки

сигналу і виведення його на дисплей. Оптичний модуль включає лазерний діод, фотоприймач, оптичний відгалужувач і оптичний роз'єм. Модульна конструкція OTDR дозволяє користувачеві не тільки вибрати необхідну йому на даний момент конфігурацію приладу, але й надалі модернізувати прилад, наприклад, за рахунок встановлення багатомодового або одномодового модуля з великим динамічним діапазоном [24].

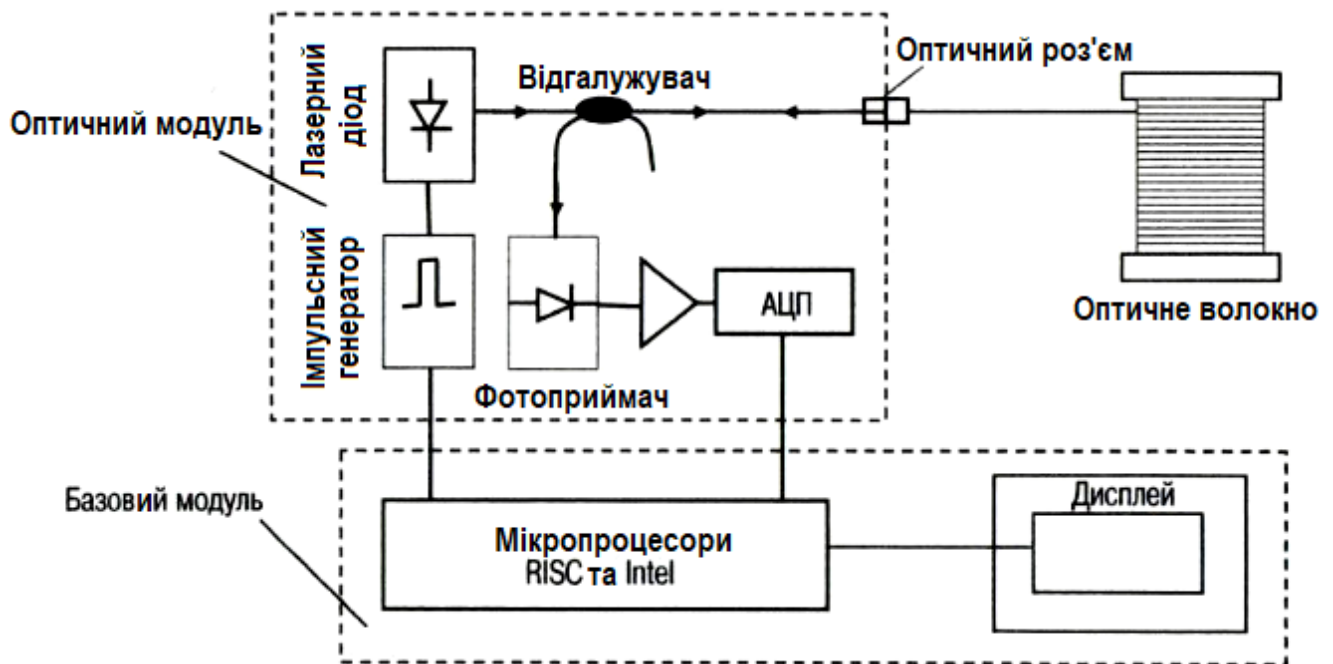


Рисунок 2.10 – Функціональна модульна конструкція OTDR

В якості джерела випромінювання в оптичному модулі зазвичай використовують лазерні діоди типу Фабрі-Перо. З їх допомогою генеруються імпульси потужністю 10...1000 мВт, тривалістю від 2 нс до 20 мкс і частотою повторення кілька кГц. Ці імпульси надходять через відгалужувач на оптичний роз'єм, до якого підключається ОВ, моніторинг якого здійснюється. Розсіяні у ОВ імпульси світла повертаються в оптичний модуль і передаються за допомогою відгалужувача на фотоприймач (лавинний фотодіод), де вони перетворюються на електричний сигнал. Цей сигнал підсилюється, накопичується, обробляється в базовому модулі та відображається на дисплеї у графічній формі у вигляді рефлектограми (див. рис. 2.9). Таке подання інформації дозволяє аналізувати її як візуально, так і автоматично за допомогою вбудованих програмних алгоритмів [24].

Потужність розсіяних у зворотному напрямі імпульсів на 80...50 дБ (залежно від їхньої тривалості) менше потужності імпульсів, що вводяться у волокно. Тому для покращення відношення сигнал/шум використовується багаторазове усереднення результатів вимірів. Причому для їх ефективного усереднення достатньо кількох секунд, тому що час, що витрачається на проходження лінії дуже малий (зокрема відстань у 100 км світло проходить за 1 мс). Типова рефлектограма містить близько 32000 вимірювальних точок і у разі обчисленні кожної такої точки усереднюється кілька тисяч імпульсів. Весь цей масив даних рефлектометр обробляє за секунду. Перша вимірjana рефлектограма одразу виводиться на дисплей. Далі на екрані виводяться вже усереднені рефлектограми. У разі кожного подвоєння часу вимірювань шуми в усередненій рефлектограмі зменшуються приблизно на 0.75 дБ [24].

Обробка великого масиву даних та створення інтерфейсу користувача реалізується за допомогою двох мікропроцесорів. Перший швидкодіючий процесор RISC дає можливість усереднювати до 50 мільйонів точок за секунду. Другий процесор Intel забезпечує роботу інтерфейсної частини програми, автопошук дефектів у лінії та виведення даних на дисплей. Він забезпечує також сумісність із комп'ютером, що дозволяє застосовувати не тільки звичайне програмне забезпечення, але й стандартну комп'ютерну периферію (клавіатуру, мишу, принтер, факс, жорсткий диск, тощо). Такий рефлектометр може використовуватися і в якості вимірювального приладу, так і в якості звичайного комп'ютера для обробки інформації [24].

На підставі проведеного аналізу основних методологічних принципів проведення вимірювань та моніторингу параметрів у сучасних ВОЛЗ, можна бачити, що здійснення вимірювань за допомогою OTDR є найбільш ефективним способом моніторингу і контролю втрат, моніторингу ослаблення та відбиттів з одного кінця ОВ. У той же час, введення в лінію зв'язку ОП та розвиток мережних технологій накладає певну специфіку на проведення таких вимірювань, яку треба враховувати у разі здійснення розробок та впровадженні систем моніторингу ВОК. Тому далі будемо аналізувати особливості такого моніторингу і вимірювань, а також обмеження, що накладаються на них, у процесі організації системи моніторингу і контролю параметрів ОВ у сучасних ВОЛЗ.

### 3 СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ СУЧАСНИХ ВОЛЗ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ OTDR

#### 3.1 Технологічні особливості та принципи організації системи моніторингу параметрів у сучасних ВОЛЗ

У разі проведення планування сучасної ВОЛЗ, особливо тих, що орієнтовані на підтримку технологій сімейства WDM, одним із найважливіших завдань є зміна форми оптичного спектра при проходженні тисячі кілометрів ОВ через велику кількість ОП. Відповідно до цього у [14] був запропонований метод, що використовує рециркулярні ланцюги. На рис. 3.1 наведена узагальнена функціональна схема реалізації вимірювання спектра з використанням ланцюга, що включає кілька ОП EDFA, що імітують елементарні підсилювальні ділянки довжиною 30 - 70 км, і забезпечує один цикл проходження сигналу протягом інтервалу часу від 0,2 до 2 мс [14].

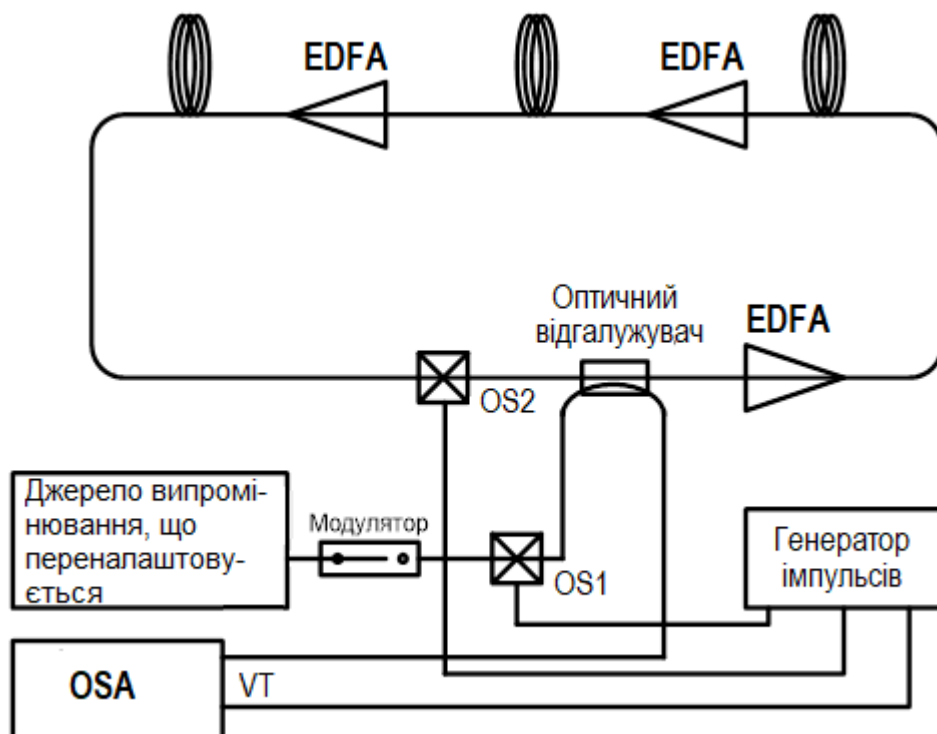


Рисунок 3.1 – Узагальнена функціональна схема системи моніторингу параметрів у ВОЛЗ

Очевидно, що кілька таких циклів відображають проходження сигналу по протяжній лінії зв'язку. Ця типова схема використовує аналізатор оптичного спектра (OSA) для вимірювання спектра у разі здійснення кожного проходження сигналом ланцюга. З цією метою в схему введено генератор імпульсів, який задає час вимірювання та виконує функції управління відповідно до сигналів, які показані на рис. 3.2 [14].

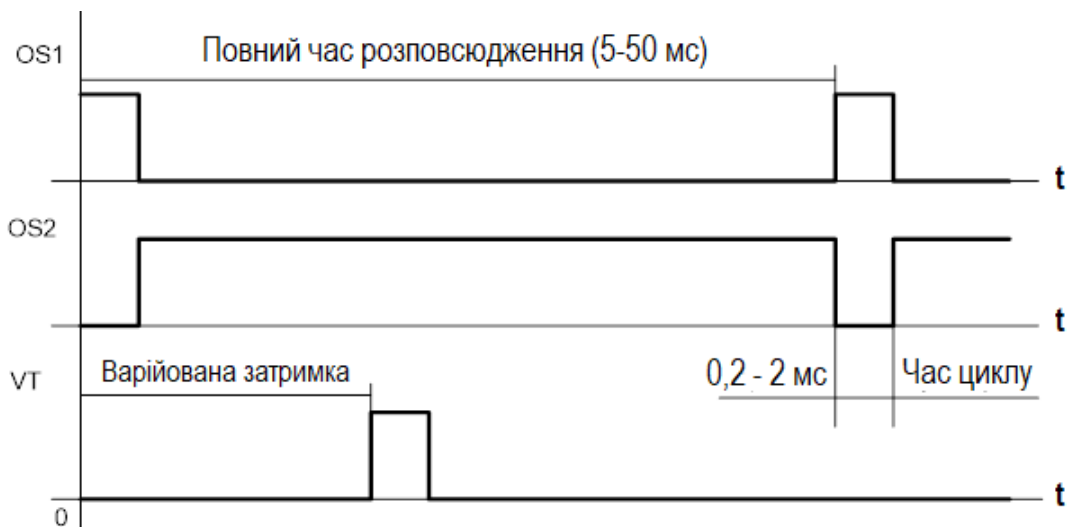


Рисунок 3.2 – Часові діаграми моніторингу спектру у ВОЛЗ

На першому етапі він встановлює оптичні перемикачі, які виконані на акустико-оптичних модуляторах OS1 і OS2, у відкритий і закритий стани, відповідно, після чого оптичний сигнал, який регенерується оптичним джерелом випромінювання, що переналаштовується, модулюється за допомогою зовнішнього модулятора сигналом псевдовипадкової бітової послідовності і надходить у рециркулярний ланцюг. На другому етапі перемикач OS1 закривається, а перемикач OS2 відкривається, даючи можливість циркулювати послідовності (приблизно 5 мс на 1000 віртуальних кілометрів). І, нарешті, на третьому етапі при затримці, яка визначається віртуальною відстанню (VT), здійснюється вимірювання спектру. Ці три етапи повторюються доти, доки буде проведено повний цикл вимірювань спектра [14].

При використанні дистанційного управління та електронної таблиці або відповідної математичної програми обробки результатів вимірювань можна створити тривимірну (3D) діаграму, що відобразить корисний сигнал та посилену спонтанну емісію (Amplified Spontaneous Emission, ASE) у вигляді функції довжини

хвилі та відстані. Є два основних методи, що реалізують цей принцип, що полягають у скануванні за довжиною хвилі або скануванні за часом [14].

У разі сканування за довжиною хвилі, OSA періодично здійснює вимірювання спектру сигналу для затримок, що послідовно змінюються, і щоразу передає дані на комп'ютер, який в кінцевому підсумку створює тривимірне зображення. Внаслідок того, що отримання однієї спектрограми займає близько однієї хвилини, загальний час виміру становить 10 - 30 хвилин і визначається кількістю диференціальних затримок. За замовчуванням кількість точок становить 800, тому даний метод забезпечує хорошу роздільну здатність за довжиною хвилі, але задля забезпечення високої роздільної здатності за відстанню потрібен значно більший загальний час вимірювання [14].

У разі сканування за часом OSA встановлюється у режим нульового інтервалу, а дифракційні ґратки виконують функцію фільтра з фіксованою довжиною хвилі. Тому сигнал, що йде на модулятор, запускає коливання ґратки, а послідовність рівнів, що має місце, представляє залежність потужності від часу на центральній довжині хвилі OSA. Якщо час коливання 50 мс і 800 точок на спектрограму, то роздільна здатність відстані складе приблизно 7.5 км. Цей вимір треба повторити для  $N$  довжин хвиль (зазвичай 50-200) для того, щоб створити тривимірне зображення. Тому  $N$  і інтервал, що охоплюється, визначають точність довжини хвилі. Зробивши припущення, що обробка даних у комп'ютері займає всього кілька секунд, то збір даних для того, щоб отримати тривимірне зображення, буде займати лише кілька хвилин [14].

## 3.2 Дослідження методики реалізації системного моніторингу параметрів на основі вимірювань OTDR у ВОЛЗ із підсилювачами

### 3.2.1 Загальні особливості методики

Через те, що ОП підсилюють як корисний сигнал, так і шум, який погіршує функціонування приймача OTDR, діапазон його вимірювання у разі моніторингу системи з оптичними підсилювачами відрізняється від діапазону моніторингу системи без ОП. Це зумовлює необхідність визначення впливу оптичних шумів на вимірювання OTDR, оскільки за наявності ОП волоконні ділянки можуть сягати більше 150 км. Очевидно, що для проведення вимірювань OTDR існує обмеження

довжини інтервалу між ОП, яке, як буде показано нижче, у практичних системах значно нижчі від вимог щодо розташування підсилювачів. Це пов'язано із накопиченням шуму [14, 24].

Для того, щоб імпульси OTDR проходили через підсилювачі з мінімальними втратами запропоновано проводити вимірювання поза смугою частот підсилення ОП, зокрема або на довжині хвилі 1310 нм, або вище за 1600 нм. Таке рішення є досить ефективним для відносно малих ділянок ВОЛЗ (менше 100 км), але, якщо відстані великі, то необхідно використовувати ОП і для здійснення підсилення імпульсів OTDR, інакше вимірювання будуть можливі тільки для окремих ділянок системи. Іншою перешкодою проведення таких вимірювань OTDR у ВОЛЗ з оптичними підсилювачами є наявність у них вбудованих ізоляторів, які використовуються для забезпечення їх стабільності функціонування. Як відомо, вимірювання OTDR ґрунтуються на релеївському зворотному розсіюванні для отримання інформації про ділянку волокна, але якщо в систему включені ізолятори, вони блокуватимуть відбите світло, і вимірювання можна буде проводити тільки на проміжку волокна між передавачем і першим підключеним підсилювачем. Існує два підходи щодо вирішення цієї проблеми [14, 23]:

- у першому випадку пропонується застосувати обхід підсилювача, за рахунок створення відгалуження від з'єднання по лінії вгору до з'єднання по лінії вниз або навпаки, забезпечуючи, тим самим, можливість поширення відбитого променя, минаючи ізолятори;

- у другому випадку розглядаються двонаправлені системи без ізоляторів. Враховуючи перспективність такого підходу далі проаналізуємо системи без ізоляторів з використанням OTDR, що функціонують на довжині хвилі, яка дорівнює приблизно 1550 нм. Для цього спочатку треба визначити оптичний шум у функції відстані від OTDR для ВОЛЗ без ОП, а потім на основі базова фізичних процесів реалізації оптичного підсилення знаходиться відношення сигнал/шум (Signal to Noise Ratio, SNR) для ВОЛЗ з ОП. Далі проводиться порівняння цих систем і розглядається відмінність в діапазонах вимірювань для таких систем [14].

### 3.2.2 Оцінка відношення сигнал/шум методом OTDR у ВОЛЗ без ОП

В результаті створеного OTDR світлового імпульсу тривалістю  $\Delta_3$ , потужність  $\Delta_1$  оптичного сигналу на вході рефлектометра у разі зворотного

релеївського розсіювання світлової хвилі потужністю  $P$  у місці неоднорідності, що розташована на відстані  $L$  від OTDR, може бути представлена у вигляді виразу [14]:

$$P = 0.5\tau RSV_2 P e^{-2\alpha L} \quad (3.1)$$

де  $\Delta_2$  – коефіцієнт релеївського розсіювання, що дорівнює  $0.7 \text{ км}^{-1}$ ;

$S$  – показник, що визначає частку розсіяного світла у зворотному напрямку, що дорівнює  $NA^2/n_1$ ;

$NA$  – цифрова апертура;

$n_1$  – показник заломлення серцевини волокна;

$\alpha$  – згасання волокна ( $\alpha = 0.00004343 \text{ м}^{-1}$  на хвилі  $\lambda = 1550 \text{ нм}$ );

$V_2$  – групова швидкість поширення імпульсу.

Загальна кількість світла, що було розсіяне у зворотному напрямку, визначається проведенням інтегрування виразу (3.1) для всіх відстаней до неоднорідностей за довжиною ОВ (рис. 3.3). У той же час, коли OTDR передає світловий імпульс, частина потужності, що була розсіяна у зворотному напрямі, буде ослаблена за рахунок загасання у ОВ. Тому у смузі пропускання, що дорівнює  $1/\tau$ , кількість виявлених фотонів буде дорівнювати [14]:

$$N = \frac{P_r}{h\nu} \tau = 0.5\tau^2 RSPV_2 e^{-2\alpha L}. \quad (3.2)$$

де  $h$  – постійна Планка, що дорівнює  $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ ;

$\nu$  – оптична частота імпульсів, що передаються.

Щоб визначити SNR, необхідно ввести параметр, який відповідає кількості мод переданого світла. Нехай  $M$  описує ступінь когерентності імпульсів, що передаються, яка для лазера з одиничною поздовжньою модою типу з розподіленням зворотним зв'язком (Distributed Feedback Laser, DFB) буде складати  $M = 1$ . Тоді кількість фотонів на моду можна визначити наступним чином [14]:

$$q = \frac{N}{M} \quad (3.3)$$

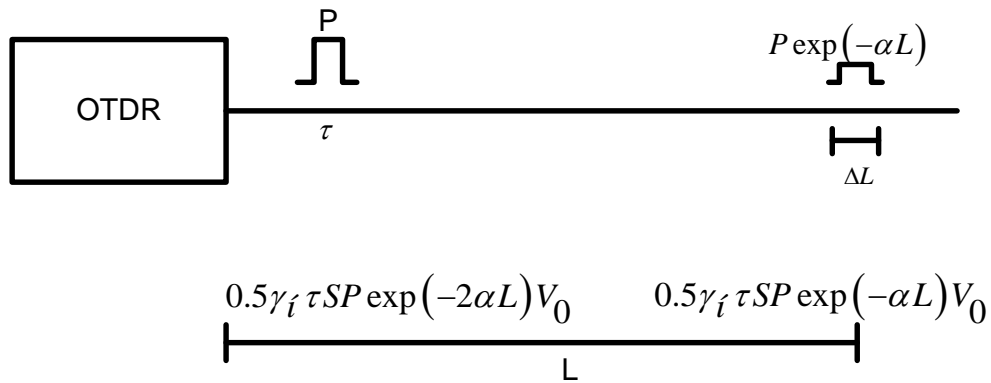


Рисунок 3.3 – Моніторинг оптичного волокна через вимірювання OTDR

Використовуючи цей вираз, SNR можна виразити, як [14]:

$$SNR = \frac{M_q}{\sqrt{\text{Var}(M_q)}} = \frac{M_q}{\sqrt{M \text{Var}(q)}} \quad (3.4)$$

де чисельник являє собою загальну кількість фотонів, що надійшли, знаменник – варіацію цієї кількості, а  $\text{Var}(q)$  – це статистична варіація кількості фотонів на моду.

Для когерентного світла  $\text{Var}(q)$  рівна  $q$  (див. (3.3)), але у випадку зі звичайним лазером, який використовується в OTDR, когерентність обмежена, тому  $\text{Var}(q)$  стає рівною  $q(q+1)$  [14].

Звідси вираз для відношення сигнал/шум, можна записати так [14]:

$$SNR = \frac{M}{\sqrt{M_q(q+1)}} = \sqrt{\frac{ME}{E + h\nu M}}, \quad (3.5)$$

де  $E$  – енергія світлового імпульсу тривалістю  $\tau$  та потужністю  $P$  для зворотного розсіювання на відстані  $L$ , що виявлена у смузі пропускання  $1/\tau$ .

Звертаючи увагу на те, що тут відношення сигнал/шум є оптичним SNR, тобто OSNR, це буде означати, що функціонування приймача OTDR не береться до уваги, і електричне відношення сигнал/шум внаслідок шумів приймача буде меншим. З виразу (3.5) можна бачити, що з позицій OSNR доцільно використовувати джерело випромінювання OTDR з як можливо більшою

кількістю мод. Приймаючи до уваги значення параметрів:  $NA = 0.2$ ;  $n_1 = 1.47$ ;  $P = 10\text{мВт}$ ,  $70\text{мВт}$ ;  $\tau = 10\text{нс}$ ;  $M = 5, 30$  та  $\lambda = 1550\text{ нм}$ , можна розрахувати залежність SNR від відстані, яка графічно матиме вигляд, який представлений на рис. 3.4. З цієї залежності видно, що для малих  $L$  SNR визначається лише значенням  $M$ , тому що в цьому випадку енергія  $E$  дуже велика і величина OSNR стає рівною кореню квадратному з  $M$ . У разі великих  $L$  значення  $M$  не впливає на OSNR, а дорівнює квадратному кореню відношення  $E$  до  $h\nu$  і тому залежить від  $L$  [14].

Як можна бачити на рис. 3.4, діапазон виміру збільшується із збільшенням потужності, а при порівнянні OTDR з лазером ( $M=5$ ) та OTDR з лазером, що має дуже велику ширину спектру ( $M=30$ ), видно, що OSNR збільшується зі збільшенням ширини спектру для коротких відстаней, проте для великих відстаней ширина спектру лазера не так важлива [14].

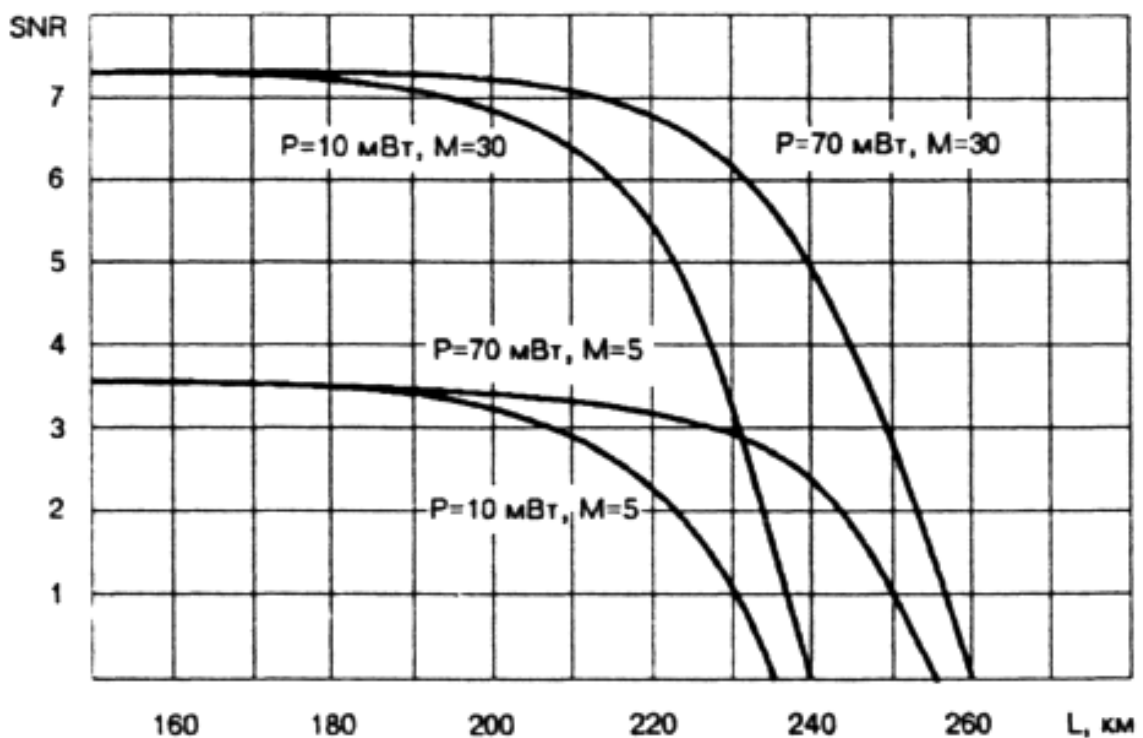


Рисунок 3.4 – Залежність відношення сигнал/шум від  $L$  для різних значень потужності  $P$  джерела випромінювання OTDR та числа мод  $M$  для ВОЛЗ без використання ОП

Це показує, що для того, щоб отримати «чисту» рефлектограму, краще використовувати лазер з великою шириною спектру, тому що діапазон

вимірювання OTDR не дуже змінюється із зміною ширини спектра лазера. Так, наприклад, у разі якщо  $M=2$  і  $P=10$  мВт, то діапазон вимірювання зменшується до 218 км порівняно з 232 км та 235 км для  $M= 5$  і 30, відповідно [14].

Тут було використано визначення діапазону вимірювання за відстанню, де  $OSNR = 1$  (0 дБ). Це показує, що у разі порівняння лазерів з широким спектром вплив на діапазон вимірювання мінімальний, але якщо спектр вузький, діапазон вимірювання залежить від  $M$  (табл. 3.1). Звідси також видно, що  $M$  має невеликий вплив на діапазон вимірювання [14].

Таблиця 3.1 – Діапазон вимірювання за відстанню в залежності від значень  $M$  і  $P$

Діапазон вимірювання	$P = 10$ мВт	$P = 70$ мВт
$M = 5$	232 км	253 км
$M = 30$	235 км	255 км

### 3.2.3 Оцінка відношення сигнал/шум методом OTDR у ВОЛЗ з ОП

Перш ніж перейти до аналізу системи моніторингу параметрів у ВОЛЗ з ОП, введемо такі положення щодо їх подальшого використання.

Вже було зазначено, що ОП, крім підсилення вхідного сигналу, створює ще і додатковий шум, який називається шумом підсиленої спонтанної емісії (ASE-шум) (рис. 3.5) [14].

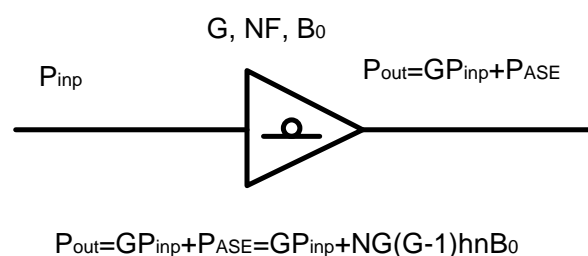


Рисунок 3.5 – Сигнали ОУ

Потужність цього шуму можна подати у наступному виразі [14]:

$$P_{ASE} = 2n_{sp} (G - 1)h\nu\Delta f_0, \quad (3.6)$$

де  $G$  і  $\Delta f_0$  – відповідно, значення коефіцієнта підсилення та смуга пропускання підсилювача;

$n_{sp}$  – коефіцієнт спонтанної емісії, що визначається за формулою [14]:

$$n_{sp} = \frac{\sigma N_2}{2(\sigma N_2 - \sigma_a N_1)}. \quad (3.7)$$

Кількість фотонів, які роблять внесок в створення ASE-шуму, можна визначити із виразу [14]:

$$N_{ASE} = \frac{P_{ASE}}{h\nu} = 2n_{sp}(G-1)\Delta f_0. \quad (3.8)$$

Тоді кількість фотонів на моду тут може бути розрахована по формулі [14]:

$$q_{ASE} = 2n_{sp}(G-1) \approx 2n_{sp}G, \quad (3.9)$$

де знак наближення відповідає великим значенням підсилення ОП. Опираючись на цю формулу, можна визначити OSNR у ВОЛЗ з ОП і порівняти його з ВОЛЗ без ОП. Для цього спочатку визначимо OSNR для ВОЛЗ із чотирма ОП (рис. 3.6) (однак треба зауважити, що їх може бути будь-яка кількість, вважаючи, що кожен ОП компенсує втрати попереднього відрізка ОВ) [14].

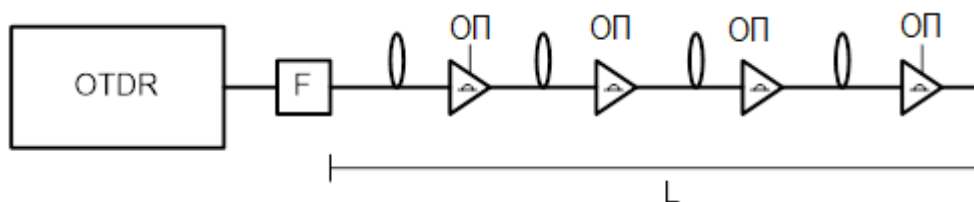


Рисунок 3.6 – Моніторинг ВОЛЗ з ОП за допомогою OTDR

При цьому для зменшення рівня шуму ASE на вході приймача OTDR, а також для того, щоб уникнути його насичення, на виході OTDR встановлений оптичний фільтр (F). У цьому випадку загальна кількість фотонів на моду, що створюються ASE-шумом підсилювача, визначається виходячи з того, що,

повертаючись на вхід OTDR, кожен ОП відповідно з формулою (3.9) робить внесок у загальну кількість фотонів на моду, який дорівнює  $N_{ОП} \cdot 2n_{sp}$ , де  $N_{ОП}$  – загальна кількість ОП. Враховуючи, що підсилення ОП дорівнює втратам ОВ, то стає очевидним, що внесок у релеївське зворотне розсіювання для даної відстані від виходу будь-якого підсилувача буде один і той же. Це показано також і на рис. 3.7 у вигляді рефлектограми для подібної системи, що наведена на рис. 3.6 [14].

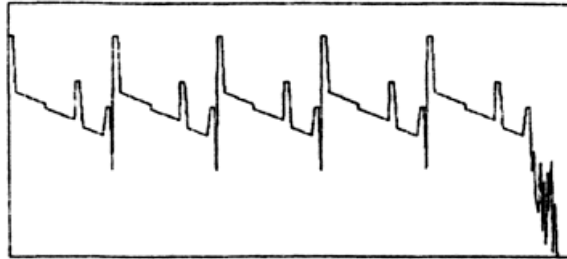


Рисунок 3.7 – Результати вимірювань OTDR у вигляді рефлектограми для ВОЛЗ із чотирма ОП

Зокрема на рис. 3.7 можна бачити, що на відстанях, які відповідають розташуванню кожного ОП, внаслідок підсилення оптичного сигналу має місце швидке його збільшення, а середній рівень підтримується постійним протягом усієї рефлектограми внаслідок компенсації втрат у ОВ за рахунок підсилення. Це передбачає, що OSNR для центрів розсіювання, що розташовані на тій самій відстані від найближчого виходу ОП, є однаковим для всього з'єднання. Тепер OSNR можна подати у вигляді виразу [14]:

$$\begin{aligned}
 OSNR_{inline} &= \frac{Mq}{\sqrt{M(q + q_{ASE})} \sqrt{(q + q_{ASE} + 1)}} = \\
 &= \frac{N}{\sqrt{(N + 2n_{sp}NO_{ПМ})(N/M + 2n_{sp}NO_{П} + 1)}}
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

де  $N$  визначається по формулі (3.2) у разі відстані, що відповідає відстані від центру розсіювання до найближчого виходу оптичного підсилувача.

З останнього виразу видно, що, як і у випадку із системою без ОП, для коротких відстаней, де кількість фотонів велика, OSNR стає пропорційним  $\sqrt{M}$ , а

для великих відстаней, на відміну від системи без ОП, залежність від  $M$  зберігається. Максимальна величина OSNR має місце за деякого значення  $M$ , яке легко визначити з урахуванням виразу (3.10), тобто за формулою [14]:

$$M_{opt} = \frac{N}{2n_{sp}N_{OY}}. \quad (3.11)$$

З наведеної формули випливає, що оптимальне значення  $M$  при кількості ОП, що дорівнює 10 з показником шуму кожного 5 дБ, визначається відстанню, як наведено на рис. 3.8, де вихідні параметри задавалися у відповідності з рис. 3.4. Отримані результати добре узгоджуються з виразом (3.10), і навіть більш того, – діапазон вимірювання збільшується із збільшенням потужності та стає меншим для  $M = 30$  у порівнянні з діапазоном для  $M = 5$ . Так, якщо відстань буде 200 км, то оптимальне значення  $M$  буде близьким до 5, що пояснює, чому OSNR вище для  $M = 5$ , чим для  $M = 30$  для великих відстаней. Для порівняння у табл. 3.2 приведені дані для системи без ОП та з ОП [14].

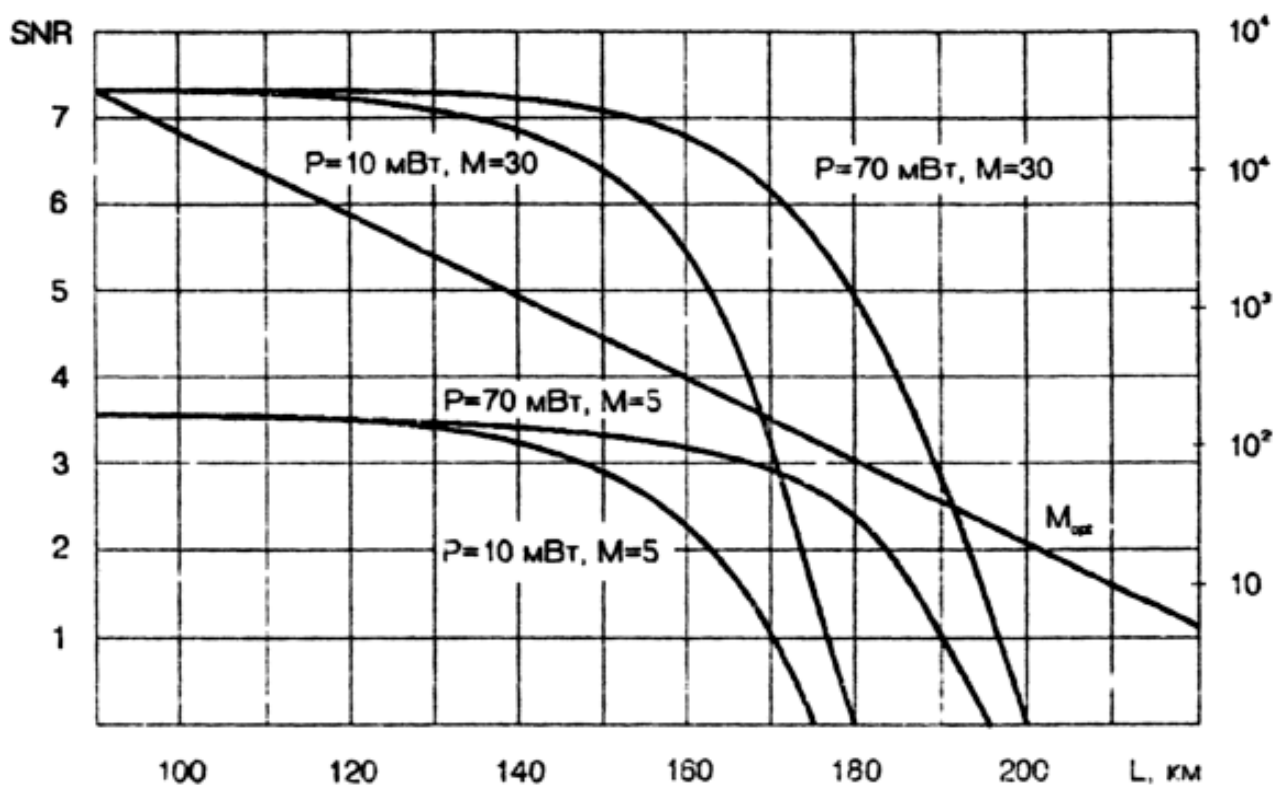


Рисунок 3.8 – Залежність відношення сигнал/шум від відстані для 10 ОП з рівнем шуму 5 дБ кожен

Таблиця 3.2 – Діапазон вимірювання по відстані в залежності від  $M$  і  $P$  для ВОЛЗ з ОП

Ступінь когерентності	Діапазон вимірювання			
	без ОП		з ОП	
	$P=10$ мВт	$P=70$ мВт	$P=10$ мВт	$P=70$ мВт
$M=5$	232 км	253 км	180 км	201 км
$M=30$	235 км	255 км	174 км	195 км

З таблиці 3.2 видно, що діапазони вимірювання у ВОЛЗ з ОП є меншими. Тут дійсний діапазон вимірювання визначається кількістю підсилювачів плюс один, помноженим на значення, що взяті з таблиці. Наприклад, у разі  $M=5$  і  $P=10$  мВт діапазон вимірювання буде дорівнювати [14]:

$$D = (10 + 1) \times 180 \text{ км} = 1980 \text{ км}.$$

Розглянемо, яким же чином функціонує OTDR у ВОЛЗ без ОП, якщо він оптимізований для ВОЛЗ з ОП і навпаки. Відповідь це питання можна отримати, використовуючи рис. 3.4. Вже зазначалося, що оптимальна кількість мод для відстані у 200 км близька до 5. Використання OTDR з цією кількістю мод, що випромінюються, призводить до зменшення OSNR на 4 дБ для коротких відстаней у порівнянні з випадком, коли  $M=30$ . Однак використання  $M=30$  у ВОЛЗ з підключеними оптичними підсилювачами зменшить діапазон вимірювання тільки на 2 - 3 км відносно оптимального значення, що має місце при  $M=5$ . Тому для обох варіантів реалізації сучасних ВОЛЗ (тобто без ОП та з їх наявністю) найкращим рішенням буде використання OTDR з великою кількістю випромінюваних мод [14].

## 4 МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ОВ У ВОЛЗ

### 4.1 Архітектура системи віддаленого моніторингу ОВ

Як було обґрунтовано у першому розділі цієї кваліфікаційної роботи, серед існуючих високошвидкісних сучасних ВОЛЗ, найперспективнішими є ті, що побудовані або будуються на базі технологій сімейства WDM. Популярність таких ВОЛЗ призвела до перегляду самих принципів їх обслуговування та експлуатації. Через великі обсяги інформації, що передається, і, як наслідок, можливу високу вартість втрат трафіку через пошкодження волокна, а також велику протяжність таких ВОЛЗ є потреба у здійсненні оперативного, кваліфікованого і систематичного їх обслуговування та своєчасній діагностиці робочих ОВ. Виконання цих завдань можливо забезпечити на основі застосування автоматизованої системи безперервного моніторингу ОВ та переходу до принципів профілактичного обслуговування ВОЛЗ [4, 6, 7].

Системи безперервного моніторингу ОВ дозволяють швидко локалізувати проблеми, відстежити деградацію оптичних волокон, та мають бути передбаченими до розгортання вже на етапі планування та проектування сучасних ВОЛЗ. Такі системи безперервного моніторингу оптичних волокон отримали назву систем дистанційного тестування ОВ (Remote Fiber Test System, RFTS). Зазначимо, що всі подібні системи RFTS, як правило, будуються за однією і тією ж самою схемою, що наведена на рис. 4.1. При цьому виділяють такі функціональні елементи та пристрої [25]:

- апаратну частину;
- систему управління;
- геоінформаційну систему (ГІС) щодо прив'язки топології мережі до карти місцевості;
- бази даних (БД) оптичного волокна, обладнання мережі, критеріїв і результатів тестування волокна ВОЛЗ та мережі в цілому;
- інші зовнішні БД.

До складу апаратної частини входить [25]:

- блоки дистанційного тестування волокон (Remote Test Unit, RTU), у які можуть встановлюватися модулі OTDR,

- модулі оптичних перемикачів (комутаторів), що забезпечують доступ до волокон, за якими здійснюється контроль (Optical Test Access Unit, OTAU);
- центральний блок управління (Test System Control, TSC) системою RFTS (центральний сервер);
- станції контролю мережі, що реалізовані на основі оптичних мережних терміналів (Optical Network Terminal, ONT).

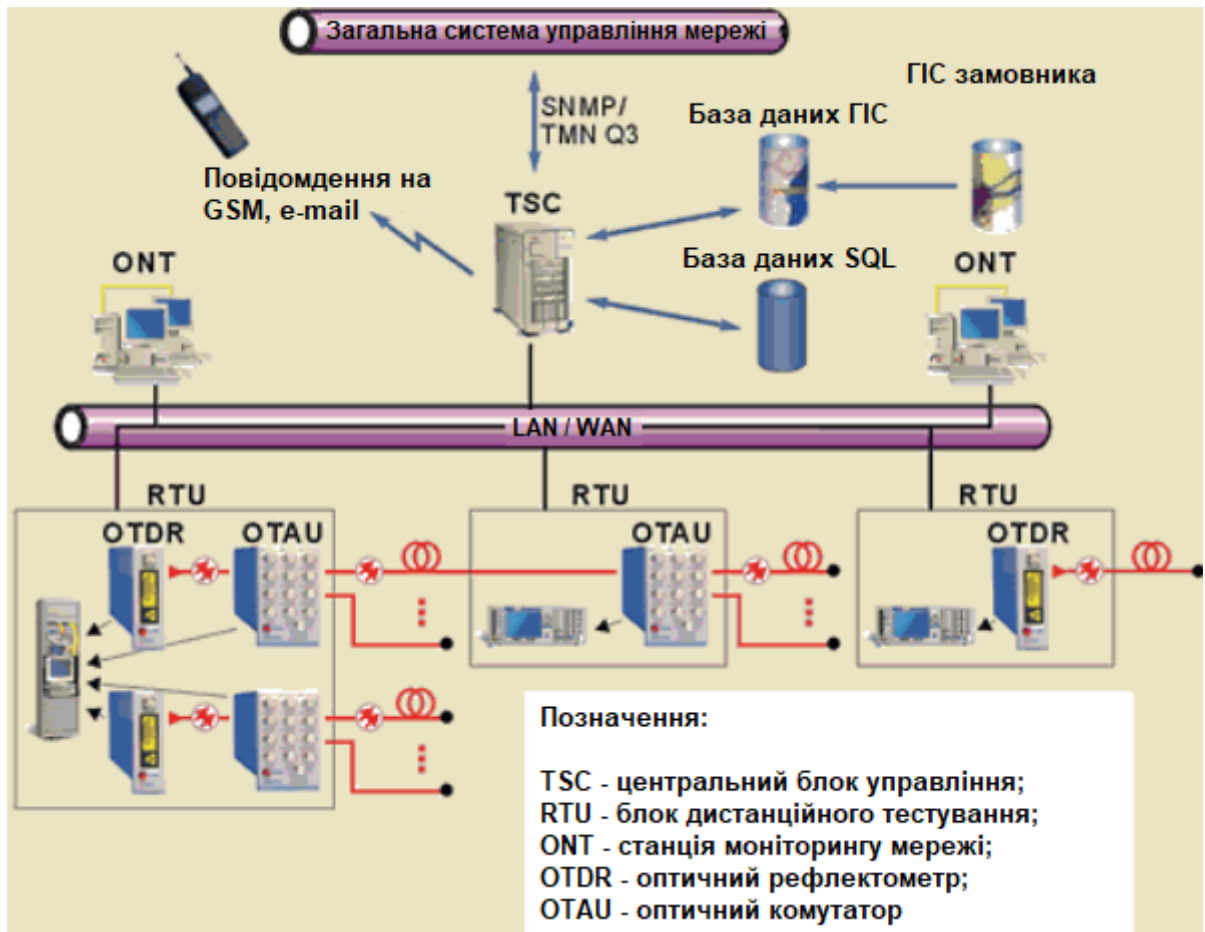


Рисунок 4.1 – Архітектура системи RFTS

У найважливіших точках мережі встановлюються блоки RTU. Конфігурація системи RFTS, тобто вибір RTU, їх розміщення на вузлах мережі та комплектація модулями OTDR, OTAU та ін., оптимізується виходячи з топології мережі, вартості обладнання, вимог надійності системи RFTS та інших критеріїв. При цьому тестуватися можуть як пасивні волокна ВОЛЗ (такий метод тестування застосовується у пасивних оптичних мережах (PON)), так і активні волокна (такий метод тестування застосовується в активних оптичних мережах) [25].

Оптичний рефлектометр OTDR періодично знімає дані щодо значень загасання в ОВ, що підключуться до нього. Кожна рефлектограма, що отримується порівнюється з еталонною, яка зазвичай відображає первісний стан волокна. Якщо відхилення від норми будуть перевищувати заздалегідь встановлені пороги (попереджувальний або аварійний), то відповідний блок RTU автоматично посилає на центральний сервер системи попередження або повідомлення про несправність. Усі рефлектограми також надходять на центральний сервер, який зберігає їх в БД для подальшої обробки. Центральний сервер системи забезпечує доступ до всіх результатів тестування ОВ для будь-якої станції, що забезпечує моніторинг мережі, та автоматично розсилає повідомлення про несправності залежно від рівня серйозності події на заздалегідь задані IP-адреси або адреси електронної, на смартфони, вузли обслуговування ВОЛЗ, тощо [24, 25].

#### 4.2 Методика моніторингу ОВ у багатоканальних ВОЛЗ на основі WDM у рамках системи управління RFTS

По мірі розвитку ВОЛЗ та впровадження на їх основі технологій спектрального мультиплексування (WDM) виникає потреба подальшого вдосконалення OTDR для здійснення роботи у мережах, що мають дуже складну структуру. У цьому випадку, наприклад, при проведенні аналізу кількох каналів результати вимірювань стають надто складними для інтерпретації і, щоб зробити їх розшифрування, необхідно проводити спеціальну процедуру тестування. Для спрощення цієї процедури використовуються методи тестування багатоканальних ВОЛЗ, які ґрунтуються на почерговому підключенні волокон до OTDR через ОТАУ, тим самим зводячи тестування багатоканальних ВОЛЗ до тестування за схемою «точка-точка». У свою чергу, це пов'язано із впровадженням додаткових компонентів у систему моніторингу, що веде до збільшення її вартості. Отже, слід розрізнити методи тестування RFTS на базі проведення вимірювань OTDR: одночасного і рознесеного у часі тестування оптичних волокон багатоканальних ВОЛЗ [24, 26].

У той же час, тестування може проводитися по волокну, що забезпечує або не забезпечує передачі даних, виділивши наступні методи тестування: по вільному (чорному) або по активному волокну [26, 27].

Проведемо більш детальний аналіз цих методів з урахуванням відмінностей у підходах до аналізу рефлектограм для, наприклад, транспортної мережі та мереж розподілу і доступу. У першому випадку аналіз здійснюється автоматично більшістю OTDR, які виявляють різні події по всій довжині ОВ. У разі вимірювань у мережах доступу та розподілу наявність компонентів, що відгалужуються, призводить до того, що OTDR демонструє множинну рефлектограму, аналіз якої до відгалуження досить простий і виконується аналогічно аналізу транспортної мережі. Однак після розгалуження виконати аналіз рефлектограми для знаходження та вимірювання подій на різних каналах стає неможливо, оскільки багатоканальні ВОЛЗ додають до неї ще один вимір, який OTDR самостійно не в змозі ідентифікувати, навіть незважаючи на те, що інформація на рефлектограмі є [26, 27].

#### 4.2.1 Одночасний моніторинг ОВ у багатоканальних ВОЛЗ

Складність одночасного тестування багатоканальних ВОЛЗ насамперед обумовлена складністю аналізу сигналу зворотного розсіювання на мультиплексорах (комутаторах) сигналів розподільчих мереж. На рис. 4.2 наведена рефлектограма, що отримана за допомогою OTDR для мультиплексора WDM, що має вісім входних портів, та який підключений до ОВ різної довжини [14].

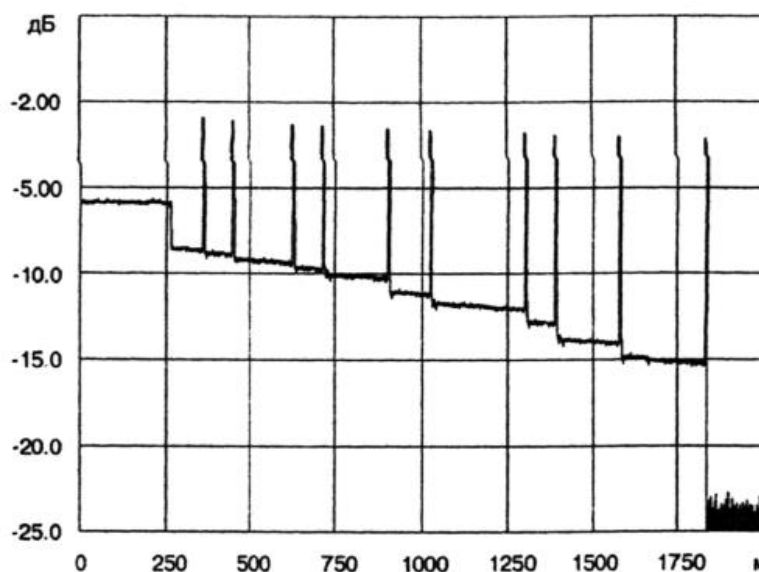


Рисунок 4.2 – Результат моніторингу ВОЛЗ із ділянкою мультиплексування

В результаті аналізу наведеної рефлектограми можна виділити два типи ослаблення багатоканального сигналу зворотного відображення, перший з яких розташовується в місці знаходження мультиплексора, а інший з'являється в точці, де закінчується відгалуження волокна (це відповідає кінцю самого ОВ). Ці ослаблення визначаються параметрами ОВ, зокрема, коефіцієнтом зворотного розсіювання, а також прямими та зворотними втратами, що вносяться мультиплексором. Для спрощення аналізу необхідно прийняти кілька припущення [14]:

- різні ОВ, що підключені до мультиплексора, мають ідентичні характеристики, тобто їх коефіцієнти зворотного розсіювання та ослаблення є рівними;
- реалізується симетричний двоспрямований перебіг процесу мультиплексування/демультиплексування, тобто мультиплексор має одні і ті ж самі характеристики у разі роботи у обох напрямках.

Враховуючи ці припущення, значення ослаблення в місці розміщення мультиплексора WDM можна визначити, використовуючи наступні вирази [14]

$$\alpha_c = 5 \log(m) + \alpha_{don}, \quad (4.1)$$

$$\alpha_{FE_i} = 5 \log((m - i + 1)/(m - i)), \quad (4.2)$$

де  $\alpha_{don}$  і  $m$  – це надлишкові втрати та кількість виходів відгалужувача;

$i$  – номер відгалуження, що аналізується.

У цьому випадку метод моніторингу буде включати етапи навчання, аналізу та ідентифікації ОВ.

Перший етап ґрунтується на імітації оптичної мережі за допомогою OTDR і може бути використаний для моделювання вимірювань, як одноканальних, так і багатоканальних ВОЛЗ. На додаток до стандартного моделювання ОВ, конекторів, зрощувань та атенюаторів, – алгоритми програмного забезпечення дозволяють синтезувати мультиплексори цих ВОЛЗ на основі наведених виразів (4.1) та (4.2). У зв'язку з цим перший етап буде включати [26, 27]:

- моделювання вимірювань, що проводяться за допомогою OTDR, в результаті чого одержують рефлектограму та відповідні їй дані;
- проведення вимірів у реальних польових умовах, внаслідок яких також одержують рефлектограму та відповідні їй дані;

- порівняння одержаних результатів, дистанційне налаштування і збереження даних.

Таким чином, на першому етапі одержують схему контрольованих ділянок мережі із позначенням точок даних рефлектограми (RP) та списком відповідних подій (ERT). Останні для проведення аналізу несуттєві і тому можуть не враховуватися [26].

Другий етап, як правило, проводиться в умовах розгортання, моніторингу чи технічного обслуговування ВОЛЗ, а саме [26, 27]:

- у процесі моніторингу, якщо система виявляє відхилення рефлектограми, що була одержана, від еталонної;

- у разі проходження трафіку, якщо виявляються несправності оптичної лінії та є необхідність у встановленні їх місцеположення та оцінки серйозності цих порушень.

На третьому етапі проводиться порівняння подій, що мають місце [26, 27]:

- згасання або ослаблення відбиття Френеля у разі відхиленні відбивної події на кінці волокна, які дозволяють безпосередньо ідентифікувати відгалуження волокна, що пов'язане з цією подією;

- відхилення значення ослаблення на ділянці оптичного волокна, що дозволяє визначити ОВ, яке закінчується на тій же самій відстані, на якій відхилення, що має місце, зникає.

Після виявлення відхилення поточної рефлектограми від еталонної визначається місцеположення несправності і проводиться її ідентифікація [26].

#### 4.2.2 Рознесений у часі моніторинг ОВ у багатоканальних ВОЛЗ

Цей метод тестування багатоканальної ВОЛЗ ґрунтується на класичному вимірюванні OTDR з'єднання типу «точка-точка», що створене відповідною комутацією оптичних перемикачів. Тому користувачу будуть доступними всі функції, що забезпечуються рефлектометром, і робота з системою моніторингу є фактично роботою з OTDR в режимі дистанційного управління, що дозволяє обробляти, аналізувати та проводити вимірювання, маючи у своєму розпорядженні широкі можливості виділення та ідентифікації відхилень поточної рефлектограми відносно еталонної. При цьому в якості еталонної рефлектограма може служити як рефлектограма, яка отримана на стадії розгортання, так і рефлектограма, що отримана у процесі експлуатації ВОЛЗ. Таким чином, цей

метод моніторингу дозволяє використовувати всі функції вимірювання OTDR. При цьому він забезпечує більш високу точність виявлення порушень у ОВ, не ускладнюючи процедури обробки рефлектограм. Зокрема цей метод включає [27]:

- вимірювання втрат, відбиттів і відстаней;
- автоматичне вимірювання із виявленням порогів, напівавтоматичне вимірювання з маркерами, ручне вимірювання із курсорами;
- локалізацію випадків порушень з'єднань, відбиттів та виявлення кінця волокна.

Технічні характеристики системи моніторингу в цьому випадку визначаються параметрами пристрою OTDR, що використовується, зокрема, його динамічним діапазоном і роздільною здатністю, а організація безпосередньо моніторингу, залежить від того, проводиться пристроєм OTDR моніторинг по пасивним або активним ОВ [27].

#### 4.2.3 Здійснення моніторингу по пасивних ОВ

Вже було зазначено раніше, що моніторинг багатоканальної ВОЛЗ по пасивним ОВ ґрунтується на тестуванні резервного волокна ВОК (рис. 4.3) у разі довжини хвиль  $\lambda_{\text{траф}}$  оптичного променя трафіку, яка є незалежною від довжини хвилі  $\lambda_{\text{тест}}$ , тестуючого оптичного випромінювання [27].



Рисунок 4.3 – Метод моніторингу оптичного кабелю по резервному ОВ

Застосування цього методу, навіть при своїй очевидності та простоті реалізації, обумовлює необхідність здійснення дублювання інфраструктури моніторингу гіпотетичного ОВ, що відбиває властивості всього кабелю, і, за даними спеціалістів, дозволяє виявити до 90% його порушень [27].

На рис. 4.4 показана схема організації контролю ВОК по пасивним ОВ, де TX (Transceiver) і RX (Receiver), відповідно передавальний та приймальний мережні пристрої; RTU – пристрій віддаленого моніторингу оптичних волокон, а ОТАУ – оптичний перемикач, що забезпечує доступ до волокон, за якими здійснюється моніторинг [27].

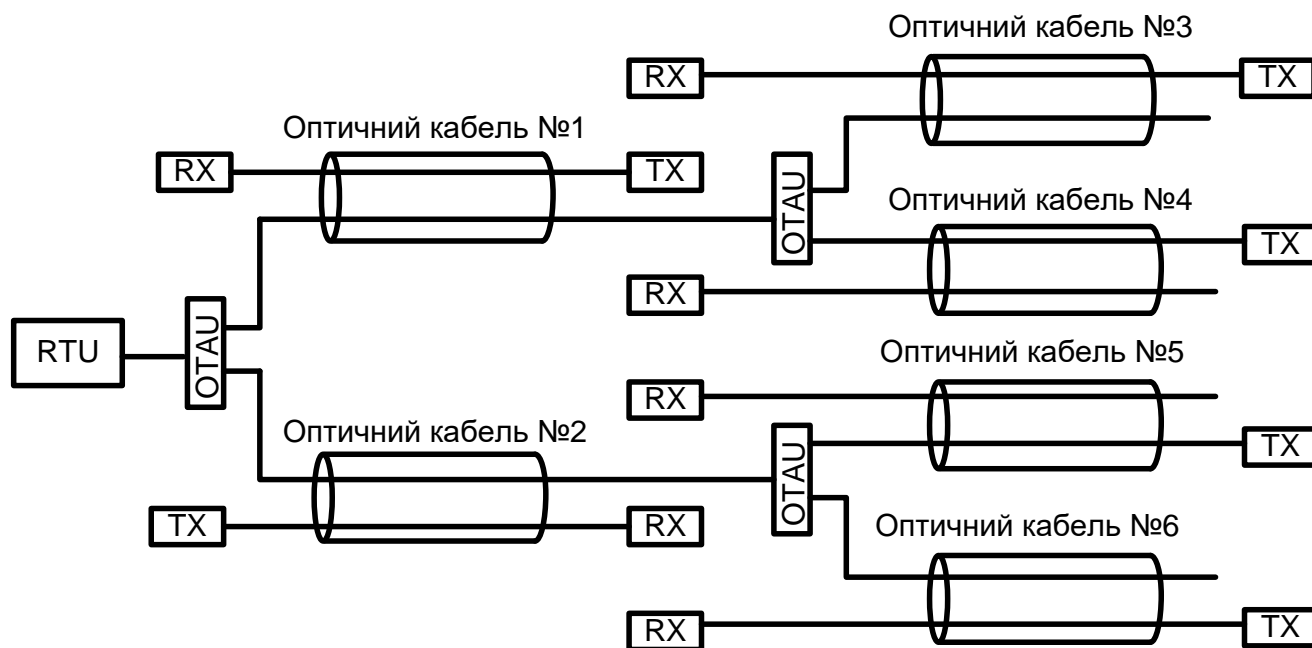


Рисунок 4.4 – Схема організації моніторингу ВОЛЗ по резервному ОВ

Значення часу  $T$ , необхідного для здійснення моніторингу  $N$  кабелей контрольованої частини ВОЛЗ, визначається за формулою [27]:

$$T = \frac{\sum \tau_i}{r} \quad (4.3)$$

де  $r$  – число рефлектметрів;

$\tau_i$  – значення часу тестування  $i$ -го оптичного кабеля;  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

#### 4.2.4 Здійснення моніторингу по активних ОВ

Як відомо, для здійснення передачі даних у сучасних ВОЛЗ зазвичай застосовуються довжини хвиль оптичного випромінювання другого (1310 нм) та/або третього (1550 нм) вікон прозорості. Отже, для контролю відстані волокон

було б доцільним використовувати  $\lambda_{\text{тест}} = 1550 \text{ нм}$  у разі передачі оптичного променя трафіку на довжині хвилі  $\lambda_{\text{траф}} = 1310 \text{ нм}$ , або  $\lambda_{\text{тест}} = 1310 \text{ нм}$  – у разі передачі на довжині хвилі  $\lambda_{\text{траф}} = 1550 \text{ нм}$ . Треба зазначити, що з економічних міркувань, що викликані необхідністю збільшення ємності ВОЛЗ, частіше використовуються довжини хвиль:  $\lambda_{\text{траф1}} = 1310 \text{ нм}$  и  $\lambda_{\text{траф2}} = 1550 \text{ нм}$ . Тому в останньому випадку для здійснення моніторингу необхідно використовувати іншу довжину хвилі, наприклад  $\lambda_{\text{тест}} = 1625 \text{ нм}$ , яка значно відрізняється від зазначених довжин хвиль передачі оптичного променя трафіку, і, як наслідок, може бути ефективно виділена на приймальній стороні ВОЛЗ [27].

З цією метою на передавальній стороні ВОЛЗ (рис. 4.5) вводяться мультиплексори WDM, що об'єднують довжину хвилі тестуючого випромінювання з довжиною хвилі передачі даних мережним обладнанням (Network Equipment, NE), а для виключення взаємного впливу процесів передачі даних та моніторингу ОБ в схему вводяться фільтри F2 та F3 [27].

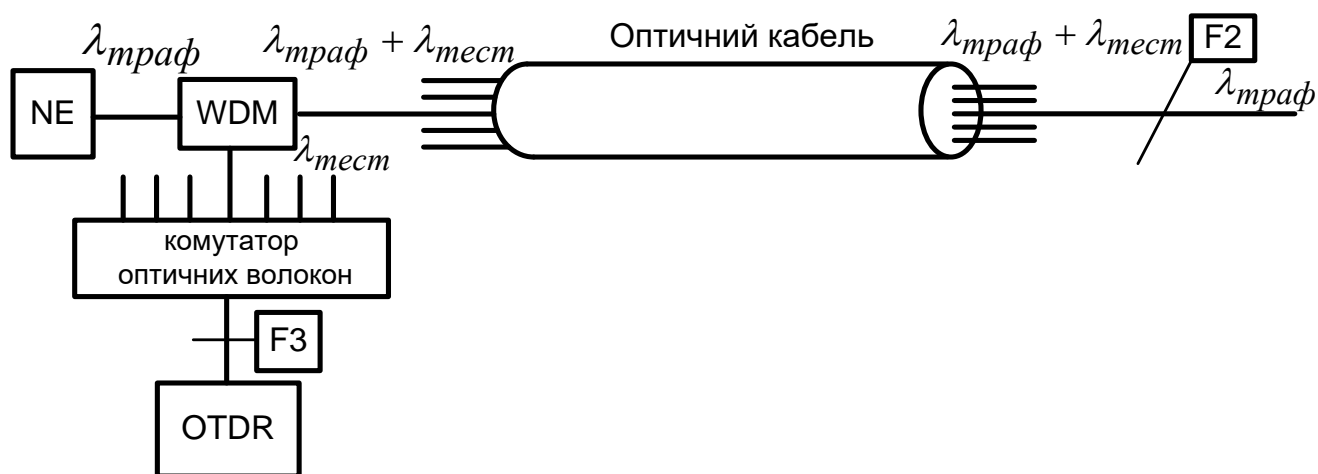


Рисунок 4.5 – Метод моніторингу оптичного кабелю по активному ОБ

Фільтри запобігають попаданню тестуючого випромінювання на входи NE, а випромінювання передачі – на пристрій OTDR. Комутатор ОБ забезпечує необхідну послідовність підключення оптичного волокна до RTU. Схема організації моніторингу по активним ОБ в цьому випадку має вигляд, що наведений на рис. 4.6 [27].

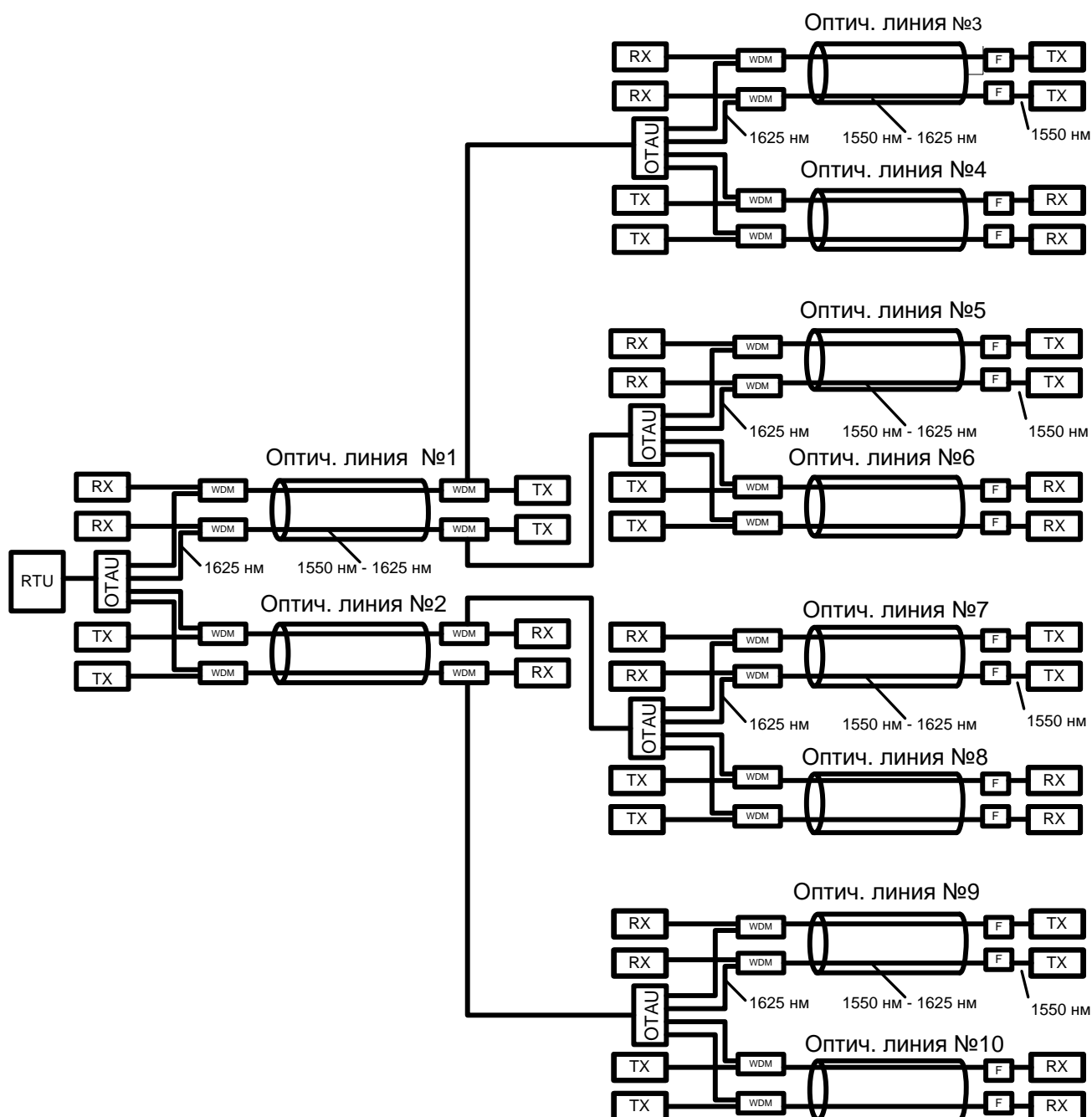


Рисунок 4.6 – Схема організації моніторингу ВОЛЗ по активним волокнам

Застосування довжин хвиль 1310 нм, 1550 нм і 1625 нм обумовлено тим, що в цьому випадку оптичні компоненти, що використовуються у техніці оптичних систем, забезпечують найнижчі втрати передачі, гарну ізоляцію та найкраще придушення відбитих хвиль [27].

Подальший розвиток методу моніторингу ВОЛЗ по активним оптичним волокнам ґрунтується на використанні більшої кількості довжин хвиль оптичного випромінювання, що поширюється по волокну, і, як наслідок, передбачає більш

ширше застосування мультиплексорів технологій сімейства WDM. У разі такого рішення одна довжина хвилі може використовуватися для тестування волокна, інші – для передачі даних. Враховуючи вищевикладене, можна навести вираз для розрахунку часу моніторингу контрольованої частини ВОЛЗ по активним ОВ [27]:

$$T = \frac{\sum m_i \tau_i}{r}, \quad (4.4)$$

де  $m_i$  – кількість ОВ у  $i$ -му ВОК;

$\tau_i$  – час тестування одного ОВ кабелю;

$i$  – номер кабелю, що тестується.

У порівнянні з вище розглянутим методом моніторингу ВОЛЗ по пасивному ОВ, цей метод моніторингу дає практично повну гарантію щодо виявлення несправностей ОВ у кабелі і відрізняється більш високою вартістю реалізації через введення в лінію зв'язку мультиплексуючого обладнання WDM і фільтрів. Тому застосування методу моніторингу по активному ОВ виявляється доцільним для тестування робочих ОВ або в тому випадку, коли для передачі даних використовуються всі волокна оптичного кабелю [27].

## ВИСНОВКИ

Метою цієї кваліфікаційної роботи було проведення аналізу методологічних принципів проведення вимірювань і моніторингу параметрів оптичних волокон у кабелях сучасних ВОЛЗ.

У першому розділі кваліфікаційної роботи зроблено аналізу технологічних особливостей та принципів побудови сучасних ВОЛЗ, наведена і описані спрощена структурна схема типової ВОЛЗ та її компоненти, а також загальні методи організації їх ОЛТ. Показано, що в залежності від методу організації ОЛТ, ВОЛЗ поділяються на [8]:

- двоволоконні одноканальні однокабельні;
- одноволоконні одноканальні однокабельні;
- одноволоконні двоканальні однокабельні;
- одноволоконні багатоканальні однокабельні.

У розділі звертається увага на те, що метод побудови ОЛТ на основі одноволоконної багатоканальної однокабельної ВОЛЗ є характерним для двохвильових WDM-систем, а для сучасних ВОЛЗ на основі WDM, що забезпечують на цей час найбільшу пропускну здатність і дальність передачі, характерний одноволоконний багатоканальний однокабельний метод побудови ОЛТ [8].

Показано, що метод WDM є найперспективнішим щодо збільшення коефіцієнта використання пропускну здатності волокна, а також дозволяє значно підвищити економічну ефективність за рахунок скорочення безпосередньо вартості волокна. Також ця технологія дозволяє забезпечити розвиток мереж деревоподібної або кільцевої конфігурації, що розширює можливості передачі сигналів з різними швидкостями та типами модуляції. Однак найбільш важливою перевагою технологій сімейства WDM є найбільш повне використання надширокої спектральної смуги пропускання волокна [4, 9].

Також зазначено, що серед технологій сімейства WDM для організації сучасних ВОЛЗ дальнього зв'язку, найбільший інтерес являє технологія DWDM, широке впровадження якої дозволяє значно збільшити кількість каналів для передачі інформації у порівнянні з класичними системами WDM. Технологічно DWDM почала розвиватися завдяки розробці і впровадженню ОП EDFA. У таких підсилювачах за рахунок енергії лазера накачки відбувається підсилення сигналів на всіх довжинах хвиль каналних інтервалів в діапазоні 1530-1565 нм (тобто

робочому діапазоні ОП EDFA). Підсилення оптичних сигналів здійснюється без перетворення в електричну форму та, відповідно, зворотного перетворення, що надає можливості для побудови ВОЛЗ високої протяжності. Тобто саме використання технологій сімейства WDM для побудови сучасних ВОЛЗ є перспективною і актуальною задачею в рамках їх подальшого розвитку [9].

Однак у процесі поширення сигнал зазнає впливу від спотворень, що виникають у ОБ. Ці спотворення ведуть до втрат енергії оптичного сигналу, а це, у свою чергу, зменшує ефективність використання смуги пропускання і зменшує дальність передачі. Тому, у разі організації високошвидкісних сучасних ВОЛЗ на основі технологій сімейства WDM велика увага приділяється проведенню системного моніторингу ефективності та цілісності передачі на кожній довжині хвилі кожного канального інтервалу, що використовується для передачі інформаційних потоків. Тобто треба звернути увагу на необхідність періодично перевіряти, тестувати та вимірювати параметри на всіх довжинах хвиль як окремі компоненти ВОЛЗ, так і всю систему в цілому, що і визначив подальший напрямок аналізу і досліджень, що проводилися у цій кваліфікаційній роботі.

У відповідності з цим у другому розділі кваліфікаційної роботи зроблений аналіз методологічних принципів проведення вимірювань та моніторингу параметрів у сучасних ВОЛЗ. До таких методологічних принципів зокрема віднесені [14]:

- деталізація характеристик компонентної бази і каналів зв'язку стосовно робочої довжини хвилі, що в достатньому обсязі можна здійснити на основі аналізу оптичного спектра;
- постійний моніторинг і вимірювання середньої канальної потужності для встановлення особливостей і закономірностей щодо розподілу потужності у всій спектральній робочій області ОП, що використовуються в ОЛТ;
- проведення вимірювань відношення сигнал/шум, яке в лініях систем WDM мають проводитися для кожного каналу;
- постійний моніторинг PMD, оскільки цей параметр може призвести до необхідності значного збільшення запасу потужності або навіть і до неможливості досягнення необхідних якісних параметрів у каналах і лініях зв'язку ВОЛЗ.

Однак найважливішими причинами виникнення порушень передачі оптичних сигналів по ВОЛЗ є обриви волокна, зміни втрат і відбиттів компонентів лінії передачі, їх старіння з часом, тощо, що й зумовлює необхідність здійснення оперативного моніторингу стану ВОЛЗ у процесі експлуатації

системи. Це вимагає створення систем моніторингу ВОЛЗ і знаходження більш ефективних методів вимірювань та моніторингу сучасних ВОЛЗ, Особливо важливим це є для ВОЛЗ дальнього зв'язку на основі технологій WDM/CWDM/DWDM [26].

Проведений аналіз методів моніторингу параметрів у сучасних ВОЛЗ показав ефективність вимірювання їх характеристик за допомогою пристроїв OTDR, які є єдиним способом здійснення моніторингу за втратами, ослабленням і відбиттям сигналу з одного кінця ОВ. Тому в кваліфікаційній роботі приділена значна увага аналізу особливостей проведення таких вимірювань і обмеженням, що на них накладаються, у процесі створення системи моніторингу параметрів в сучасних ВОЛЗ [23, 24].

У третьому розділі кваліфікаційної роботи обґрунтована методика організації системи моніторингу параметрів сучасних ВОЛЗ із застосуванням OTDR. Зокрема запропонована та обґрунтована функціональна схема системи моніторингу параметрів у ВОЛЗ, проведений аналіз методики організації системного моніторингу параметрів з використанням вимірювань OTDR у ВОЛЗ з оптичними підсилювачами. Зокрема у процесі цього аналізу наведена порівняльна оцінка відношення сигнал/шум для оптичного сигналу методом OTDR у ВОЛЗ без підсилювачів і з оптичними підсилювачами. Показано, що оптимальна кількість випромінюваних мод OTDR у разі відстані 200 км близька до 5. Використання OTDR з такою кількістю випромінюваних мод призводить до зменшення OSNR на 4 дБ для коротких відстаней порівняно з випадком, коли  $M = 30$ . Однак використання  $M = 30$  у ВОЛЗ із ОП зменшить діапазон вимірювання тільки на 2 - 3 км відносно оптимального значення, що має місце за  $M = 5$ . Тому для обох варіантів реалізації ВОЛЗ (без ОП і з наявністю ОП) найкращим рішенням є використання OTDR з великою кількістю випромінюваних мод [14].

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи запропонована методика реалізації системи моніторингу параметрів ОВ у ВОЛЗ. Зокрема розглянуті особливості архітектурної реалізації системи віддаленого тестування оптичних волокон RFTS. Як показано, принцип дії RFTS також ґрунтується на використанні оптичних рефлектометрів OTDR, які здійснюють вимірювання параметрів ВОЛЗ за зворотним розсіюванням світлової хвилі [25].

У відповідності до архітектури RFTS зроблено аналіз і систематизовані методи моніторингу параметрів оптичних кабелів на основі OTDR вимірювань у ВОЛЗ на основі WDM. Зокрема розглянуто методи моніторингу ВОЛЗ, що мають

дуже складну структуру, та які ґрунтуються на одночасному і рознесеному в часі OTDR-тестуванні ділянок ВОЛЗ. Показано, що з цією метою в першому випадку має використовуватися спеціальний метод аналізу рефлектограм, тоді як у другому випадку в лінію зв'язку необхідно вводити додаткові оптичні перемикачі. Це дає змогу проводити класичний аналіз рефлектограм, досягаючи більш високої точності ідентифікації порушень ВОЛЗ. Ці методи моніторингу застосовуються для виявлення порушень, як по пасивному, так і по активному волокну. При цьому в першому випадку проводиться моніторинг по резервному ОВ, що не призначене для передачі даних. По результатах моніторингу судять про справність всієї ділянки ВОЛЗ, за якою здійснюється моніторинг (забезпечення такого моніторингу не вимагає модифікації діючих ВОЛЗ). У другому випадку здійснюється моніторинг волокна, по якому здійснюється передача даних, у зв'язку з чим в оптичну лінію уводиться оптичне випромінювання довжини хвилі, що є відмінною від довжини хвилі випромінювання, яке використовується для передачі даних, а на приймальному боці здійснюється розділення цих хвиль. Очевидно, що цей принцип може використовуватися як для одного волокна, так і для всіх волокон ВОЛЗ, за якими встановлений моніторинг, і це вимагає введення у ВОЛЗ додаткових компонентів [14, 27].

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Величанский В.Л. Лабораторный практикум «Волоконно-оптическая линия связи» / В.Л. Величанский, В.К. Егоров – М.: МИФИ, 2008. – 80 с.
2. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Тренз, 2001. – 268 с.
3. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н.Н. Слепов. – М.: Радио и связь, 2003. – 468 с.
4. Наний О.Е. Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM) / О.Е. Наний // LightWave Russian Edition. – №2. – 2004. – С. 47 - 52.
5. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М.: Техносфера, 2007. – 512 с.
6. Стищенко И.К. ВОЛС и мониторинг оптических кабелей / И.К. Стищенко // Науково-технічний журнал «Захист інформації» – №1. – 2002. – С. 43 - 50
7. Кнак С.А. Методы мониторинга волоконно-оптических линий передачи / С.А. Кнак [Электронный ресурс] // Материалы конференции «Современные проблемы телекоммуникаций» Сибирского ГУ телекоммуникаций и информатики, Сибирской секции Международного института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике IEEE. – Новосибирск. – 2015. – С. 315 - 329. – Режим доступа до ресурсу: <https://studfile.net/preview/16709023/page:32/>.
8. Основы оптической связи [Текст]: сб. лекций / Г.Х. Миразимова; под общ. ред. Р.И. Исаева. – Ташкент: ТУИТ, 2008. – 119 с.
9. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA / Р.Р. Убайдуллаев // Lightwave Russian Edition. – № 1. – 2003. – С. 22–28.
10. Слепов Н.Н. Технология разреженных систем WDM (CWDM): особенности и применение / Н.Н. Слепов // Технологии и средства связи. – №1. – 2007.
11. Компоненты DWDM систем и их характеристики / Xtera Communications Inc. // LightWave Russian Edition. – 2005. – №2. – С. 50 - 56.
12. Павлов И.П. Системы DWDM: особенности и применение [Электронный ресурс] / И.П. Павлов // Сети и Системы Связи. – 2003. – №4 (96). – Режим доступа до ресурсу: [http://www.ccc.ru/magazine/depot/03\\_04/0302.htm](http://www.ccc.ru/magazine/depot/03_04/0302.htm).
13. Колпаков И.А. Вопросы и проблемы построения оптических сетей [Электронный ресурс] / И.А. Колпаков, С.Ю. Колгатин, В.А. Нестеркин //

Кабельщик. – №5. – 2006. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat280606>.

14. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / А.Б. Иванов. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2017. – 658 с.

15. Измерение оптического отношения сигнал/шум в когерентных системах с использованием передачи с поляризационным мультиплексированием [Электронный ресурс] // Компания «СВЯЗЬКОМПЛЕКТ». – Доступ здійснено 18.04.2024. – Режим доступа до ресурсу: <https://skomplekt.com/izmerenie-opticheskogo-otnosheniia-signal-shum-viavi-scorm/>

16. Методы измерения параметров оптических компонентов, ВОЛС и ВОСП. Часть 1. Измерение оптической мощности, затухания и вносимых потерь. [Электронный ресурс] // Группа компаний «Строй-ТК». – 2019. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.stroi-tk.ru/info/articles/vols-stat1/izm\\_vols/izm\\_vols1/](http://www.stroi-tk.ru/info/articles/vols-stat1/izm_vols/izm_vols1/).

17. Методы измерения параметров оптических компонентов, ВОЛС и ВОСП. Часть 3. Измерение оптической мощности, затухания и вносимых потерь. [Электронный ресурс] // Группа компаний «Строй-ТК». – 2019. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.stroi-tk.ru/info/articles/vols-stat1/izm\\_vols/izm\\_vols3/](http://www.stroi-tk.ru/info/articles/vols-stat1/izm_vols/izm_vols3/).

18. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О.К. Скляров. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 272 с.

19. Скляров О.К. Измерение системных параметров с повышенной пропускной способностью / О.К. Скляров // Метрология и измерительная техника в связи. – №6. – 2002.

20. Скляров О.К. Измерение отношения сигнал/шум при передаче дискретной информации по оптическим линиям связи / О.К. Скляров // Сборник научных трудов ЦНИИС. – 2001. – №1. – С. 152-158.

21. Гладышевский М.А. Поляризационная модовая дисперсия в оптическом волокне LightWave Russian Edition. – №1. – 2005.– С. 48 – 51.

22. Янышев Ш.Б. Задача анализа волоконно-оптических линий, характеризующих поляризационные эффекты/ Ш.Б. Янышев // Наука и современность. – 2011. – С. 58 – 63.

23. Сварка оптических волокон. Часть 4: измерения на оптике, снятие и анализ рефлектограммы [Электронный ресурс] // Хабр: IT-инфраструктура, сетевые технологии. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/ru/articles/227647/>.

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

25. Кабышева А.М. Архитектура и основные функции системы мониторинга RFTS / А.М. Кабышева // НТК Современные проблемы телекоммуникаций. – Новосибирск: Сибирское отделение МАИ IEEE, 2015. – С. 303 – 307.

26. Смирнов И. Измерения на ВОЛС [Электронный ресурс] / Илья Смирнов // ВОЛС.Эксперт. Все о волоконно-оптических линиях связи. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: <https://vols.expert/useful-information/izmereniya-vols/>.

27. Горлов Н.И. Организация строительства и эксплуатации волоконно-оптических линий передачи. Часть 2. Строительство: учеб. пособ. [Электронный ресурс] / Н. И. Горлов, В. В. Бутенков, Л. В. Первушина и др. // – Новосибирск: Сибирский ГУТИ, 2017. – 434 с. – Режим доступа до ресурсу: [https://bstudy.net/849127/tehnika/organizatsiya\\_stroitelstva\\_i\\_ekspluatatsii\\_volokonno-opticheskikh\\_linii\\_peredachi\\_chast\\_2\\_stroitelstvo](https://bstudy.net/849127/tehnika/organizatsiya_stroitelstva_i_ekspluatatsii_volokonno-opticheskikh_linii_peredachi_chast_2_stroitelstvo).