

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

О. Г. Григоренко, Г. Д. Созонник, О. О. Трубін

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»
спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Електронне мережеве навчальне видання

1-е видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2024

УДК 621.39 (XXX)
В19

Автори: *Григоренко Олена Григорівна*, канд. техн. наук, доц.
Созонник Галина Дмитрівна, канд. техн. наук, доц.
Трубін Олександр Олексійович, д-р техн. наук, проф.
Рецензент *Рєпа Федір Михайлович*, к. т. н., доц., доц. каф. інформаційної
безпеки НН ФТІ КПІ ім. Ігоря Сікорського
Відповідальний
редактор *Новіков Валерій Іванович*, к.т.н.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 29.02.2024 р.)
за поданням вченої ради навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем
(протокол № 1 від 29.01.2024 р.)*

Григоренко О. Г.
В19 Волоконно-оптичні інфраструктури електронних комунікацій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей» спец. 172 Електронні комунікації та радіотехніка / О. Г. Григоренко, Г. Д. Созонник, О. О. Трубін ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 1-е вид. – Електрон. текст. дані (1 файл: 28 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 138 с.

Навчальний посібник містить відомості щодо пасивних і активних компонентів волоконно-оптичної інфраструктури, їх призначення, особливостей функціонування та параметрів. Значна увага приділена питанням проведення вимірювань параметрів волоконно-оптичного тракту за допомогою оптичних тестерів та оптичних рефлектометрів. Представлена інформація має практичне значення при обслуговуванні і експлуатації волоконно-оптичної інфраструктури. Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей» за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка, буде також корисним для тих, хто займається експлуатацією.

УДК 621.39 (XXX)

Реєстр. № НП 23/24-317. Обсяг 6,2 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© О. Г. Григоренко, Г. Д. Созонник, О. О. Трубін, 2024
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

ЗМІСТ

Список скорочень.....	4
Розділ 1 Оптичні волокна. Оптичні кабелі.....	6
1.1 Переваги використання фізичного середовища - оптичного волокна.....	6
1.2 Властивості та параметри оптичних волокон, оптичних кабелів.....	7
1.3 Типи оптичних волокон.....	15
1.4 Оптичні кабелі. Конструкція оптичних кабелів.....	21
Контрольні питання.....	25
Практична робота 1.....	26
Вивчення конструкції та параметрів оптичних кабелів, оптичних волокон.....	26
Розділ 2 Пасивні компоненти ВОЛТ.....	28
2.1 Оптичні розгалужувачі та відгалужувачі (спліттери).....	29
2.2 Оптичні з'єднання.....	31
2.3 Оптичні ізолятори.....	44
2.4 Оптичні атенюатори.....	46
2.5 Оптичні комутатори.....	49
2.6 Пристрої компенсації хроматичної дисперсії.....	52
2.7 Оптичні мультиплексори/ демультимплексори.....	52
Контрольні питання.....	55
Практична робота 2.....	56
Вивчення конструкції оптичних конекторів, ODF та параметрів оптичних з'єднань.....	56
Розділ 3 Активні компоненти ВОЛТ.....	57
3.1 Передавальний оптоелектронний модуль.....	57
3.2 Приймальний оптоелектронний модуль.....	64
3.3 Оптичні підсилювачі.....	71
Контрольні питання.....	79
Розділ 4 Вимірювання параметрів оптичного волокна за допомогою оптичних тестерів та оптичних рефлектометрів.....	80
4.1 Вимірювання параметрів оптичного волокна за допомогою оптичних тестерів.....	80
Контрольні питання.....	90
4.2 Вимірювання параметрів оптичного волокна за допомогою оптичних рефлектометрів...	90
Контрольні питання.....	136
Список посилань.....	137

Список скорочень

- ОВ - оптичне волокно
- ОК - оптичний кабель
- ОМ - оптичний модуль
- ОМ ОВ - одномодове оптичне волокно
- БМ ОВ - багатомодове оптичне волокно
- ПМД - поляризаційна модова дисперсія
- ОР - оптичний рефлектометр
- ВОЛЗ - волоконно-оптична лінія зв'язку
- ВОСП - волоконно-оптична система передавання
- ПОМ - передавальний оптичний модуль
- ПРОМ - приймальний оптичний модуль
- ЛД - лазерний діод
- СВД - світловипромінюючий діод
- ЛФД - лавинний фотодіод
- РС - роз'ємний з'єднувач
- СЦІ - синхронна цифрова ієрархія
- МСЕ - Міжнародний Союз Електрозв'язку
- WDM - Wavelength Division Multiplexing - мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі
- DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing - щільне мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі
- CWDM - Coarse Wavelength Division Multiplexing - грубе мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі
- SMF - Single Mode Fiber - одномодове оптичне волокно
- SSF - Standard Single Mode Fiber - стандартне одномодове оптичне волокно
- DSF - Dispersion Shifted Fiber - ОВ зі зміщеною нульовою дисперсією
- NZDSF - Non Zero Dispersion Shifted Fiber - ОВ зі зміщеною ненульовою дисперсією
- ZWPF - Zero Water Peak Fiber - ОВ з нульовим “водяним” піком
- PMD - Polarization Mode Dispersion - поляризаційна модова дисперсія
- MLM - Multi Longitudinal Mode - ЛД з багатьма поздовжніми модами
- SLM - Single Longitudinal Mode - ЛД з однією поздовжньою модою
- AWG- Arrayed Waveguide Grating - решітка на основі масиву хвилеводів
- OADM - Optical Add Drop Multiplexer - оптичний мультиплексор введення / виведення
- OM - Optical Multiplexer - оптичний мультиплексор
- ODM - Optical Demultiplexer - оптичний демультимплексор

OXC - Optical Cross Connect - оптичний крос-комутатор

OA - Optical Amplifier - оптичний підсилювач

EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier - підсилювач на відрізку ОВ, легованого іонами ербію

ASE - Amplified Spontaneous Emission - підсилене спонтанне випромінювання

ORL - Optical Return Loss - оптичні зворотні втрати

IL - Insertion Loss - внесене загасання

ODF - Optical Distributed Feedback - оптичний розподільний крос

NA - Numerical Aperture - числова апертура

FC/PC - Fiber Connector / Physical Contact - волоконний конектор / фізичний контакт

SPC - Super Physical Contact - супер фізичний контакт

UPC - Ultra Physical Contact - ультра фізичний контакт

APC - Angled Physical Contact - кутовий фізичний контакт

MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems - мікроелектромеханічні системи

DCF - Dispersion Compensating Fiber - волокно, що компенсує дисперсію

DCG - Dispersion Compensating Grating - решітка, що компенсує дисперсію

FPR - Fabry Perot Resonator - резонатор Фабрі-Перо

DFB - Distributed FeedBack - розподілений зворотний зв'язок

DBR - Distributed Bragg Reflector - розподілене Брегівське відбиття

SFP - Small Form factor Pluggable - оптичний модуль з малим форм-фактором, що встановлюється

BER - Bit Error Ratio - коефіцієнт помилок за бітами

SDH - Synchronous Digital Hierarchy - синхронна цифрова ієрархія

STM - Synchronous Transport Module - синхронний транспортний модуль

SNR - Signal Noise Ratio - відношення сигнал/шум

ITU-T - International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector - Міжнародний Союз Електрозв'язку, сектор стандартизації у телекомунікаціях

FTTH - Fiber to the Home - оптичне волокно до дому

PON - Passive Optical Network - пасивна оптична мережа

Розділ 1 Оптичні волокна. Оптичні кабелі

1.1 Переваги використання фізичного середовища - оптичного волокна

1. Велика пропускна здатність 300 Тбіт/с (наприклад, в одному оптичному волокні (ОВ) 80 оптичних каналів×10Гбіт/с)
2. Мале загасання - на довжині хвилі $\lambda=1550$ нм $\alpha=0,2$ дБ/км (перейти до частоти можна за виразом $F=c/\lambda$, де $c=3 \cdot 10^8$ м/с)
3. Велика завадозахищеність; ОВ практично нічого не випромінює назовні
4. Мала маса і габарити

Діапазон видимого світла 380-780 нм, а волоконно-оптичні лінії працюють в діапазоні довжин хвиль 850-1675 нм.

Оптичне волокно (ОВ) представляє собою моноструктуру з кварцового скла у пластиковій оболонці (рис.1.1.1), де серцевина та оболонка мають різні показники заломлення. Показник заломлення серцевини більше показника заломлення оболонки $n_c > n_{об}$.

Показник заломлення $n=c/v$,

де c - швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі,

v - швидкість електромагнітної хвилі у фізичному середовищі (в оптичному волокні).



Рис.1.1.1 Структура оптичного волокна

Так як кварцове скло крихке, оптичне волокно покривають захисними оболонками полімерних матеріалів (рис.1.1.1).

Оптичне волокно, захищене однією чи кількома захисними оболонками, називається первинним оптичним модулем.

Первинний оптичний модуль чи сукупність оптичних модулів становлять основу оптичного кабелю.

Оптичні кабелі (ОК) мають різні, досить складні конструкції, що відповідають тим чи іншим умовам застосування.

1.2 Властивості та параметри оптичних волокон, оптичних кабелів

Використовуваний у ВОСП (волоконно-оптичних системах передачі) діапазон довжин хвиль оптичних волокон на основі кварцового скла становить від 850 нм до 1675 нм (рис.1.2.1).

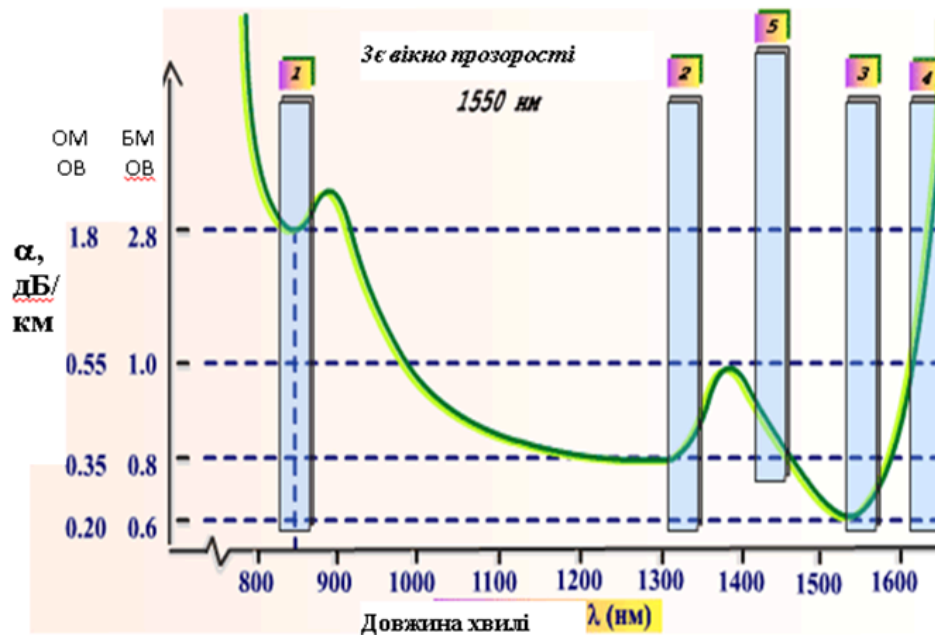


Рис. 1.2.1 Спектральна залежність загасання ОВ

Вікно прозорості – це область довжин хвиль на кривій загасання (рис.1.2.1), де коефіцієнт загасання має мінімальне значення. 1-е вікно прозорості відповідає довжині хвилі 850 нм, 2-е вікно прозорості – 1310 нм, 3-є – 1550 нм, 4-е – 1620 нм, 5-е – 1420 нм. Устаткування СЦІ (синхронної цифрової ієрархії) працює у 2-му та 3-му вікнах прозорості, що відповідає довжинам хвиль 1310 нм і 1550 нм.

Основою конструювання оптичних кабелів (ОК) та основним принципом роботи ОК є реалізація закону Снеліуса (рис.1.2.2). Якщо промінь падає на границю розділу двох середовищ (n_1 і n_2), то він частково відбивається, а частково проходить до другого середовища (тобто заломлюється).

$$n_1 \sin \Theta_{\text{пад}} = n_2 \sin \Theta_{\text{залом}},$$

де n_1 і n_2 - показники заломлення середовищ,

$\Theta_{\text{пад}}$ і $\Theta_{\text{залом}}$ - кути падіння і заломлення.

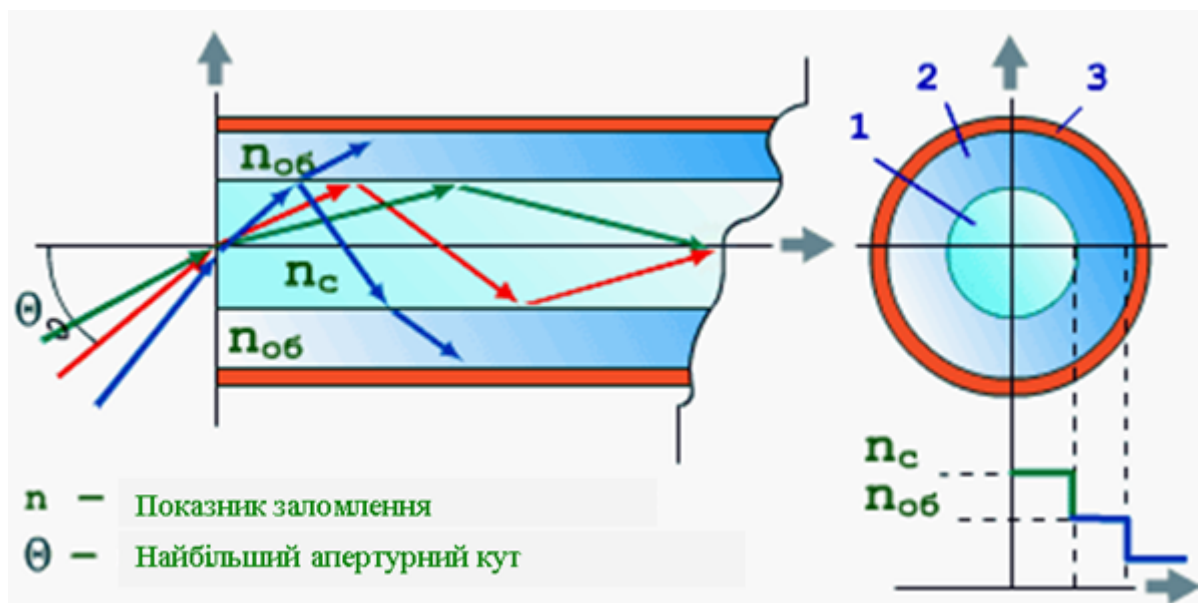


Рис.1.2.2 Розповсюдження світла в оптичному волокні зі сходишковим профілем показника заломлення

Фізичною основою передачі світлового сигналу оптичного волокна служить явище повного внутрішнього відбиття світла від межі розділу двох середовищ з різними показниками заломлення: серцевина/оболонка (умова виконання цього явища - кут заломлення = 90°).

Підбираючи n_1 і n_2 , можна домогтися, щоб кут заломлення становив 90° (рис.3).

Розрізняють такі типи променів в ОВ:

- Напрямні — основний тип променів, що зазнають повного внутрішнього відображення (апертурні промені на рис.1.2.3 - блакитні).

- Витікаючі - на межі серцевина-оболонка заломлюються і поширюються в оболонці, втрачаючи при цьому частину енергії. На деякій відстані від початку волокна загасають (приблизно 1-3 км). (Неапертурні промені на рис.1.2.3 - червоні).

- Випромінені — випромінюються з оболонки в навколишній простір.

Враховуючи кінцевий діаметр серцевини (рис.1.2.3), в ОВ потрапляє не один промінь, а потік променів, що утворюють вхідний конус з кутом при вершині $\Theta_{\text{крит}}$, що визначається так званою числовою апертурою NA (еквівалентом половинного кута при вершині конуса, рівного апертурному куту критичному):

$$NA_0 = \sin\Theta_{\text{крит}} = \sqrt{n_c^2 - n_o^2},$$

де n_c – показник заломлення серцевини, n_o – показник заломлення оболонки.

Промені, які потрапляють під кутом $\Theta \leq \Theta_{\text{крит}}$ – апертурні, якщо ні – неапертурні.

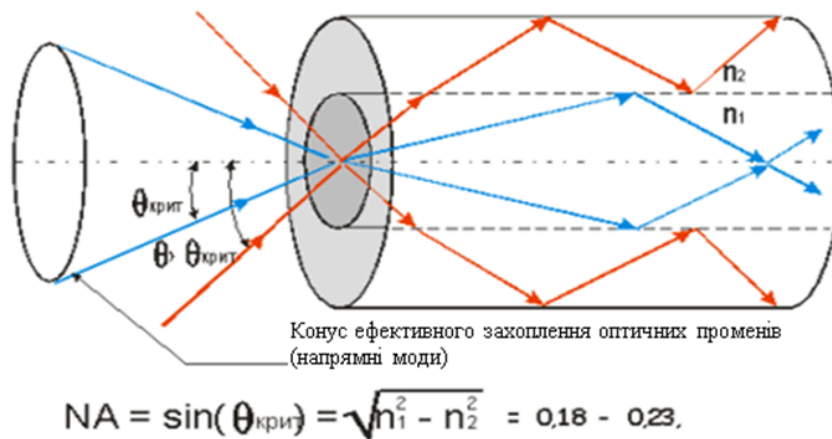


Рис. 1.2.3 Числова апертура ОВ (NA)

$\Theta_{\text{крит}}$ – кут введення променя до серцевини, при якому на границі розділу серцевина-оболонка відбувається повне внутрішнє відбиття, тобто утворюються напрямні моди.

Числова апертура ОВ дозволяє сформулювати вимоги до діаграми направленості випромінювача (світловипромінюючого або лазерного діоду) і тим самим зменшити втрати енергії випромінювача при введенні її до ОВ.

Числова апертура також впливає на пропускну здатність ОВ – обсяг інформації, який можна передати із заданою достовірністю на задану відстань.

Збільшення числової апертури призводить до зменшення пропускну здатності ОВ. Вище сказане означає, що конструювання ОВ передбачає рішення оптимізаційної задачі, стосовно конкретного призначення ОВ (наприклад, для магістральних або локальних мереж).

Розповсюдження оптичного сигналу в ОВ описується законами геометричної оптики та хвильової теорії (теорії електромагнітних хвиль).

Застосовуються багатомодові та одномодові ОВ.

Мода - тип електромагнітної хвилі з відповідними характерними ознаками (траєкторія поширення (прямолінійна, криволінійна); співвідношення діаметра серцевини і довжини хвилі λ ; площа поляризації електромагнітної хвилі).

Кількість мод, що розповсюджуються в ОВ, визначається із рішення системи рівнянь Максвелла.

В оптиці основна хвиля HE_{11} - основна мода. Тобто, це складна хвиля зі складовими електричного і магнітного поля по усім трьом координатам x, y, z .

В одномодових волокнах поширюється один тип хвилі (одна мода HE_{11}). В багатомодових волокнах поширюється багато типів хвиль.

Параметри ОВ, ОК:

- Геометричні
- Конструктивні
- Оптичні (передавальні) –відповідають за передачу оптичного сигналу по ОВ

Основні передавальні параметри:

- Довжина хвилі 1550 нм, де коефіцієнт загасання ОВ $\alpha=0,2$ дБ/км; 1310 нм , де коефіцієнт загасання ОВ $\alpha=0,33\dots 0,35$ дБ/км; 850 нм, де коефіцієнт загасання ОВ $\alpha=2,5$ дБ/км і більше ; 1625 нм та 1420 нм, де коефіцієнт загасання ОВ α не перевищує $0,25\dots 0,3$ дБ/км;

- Коефіцієнт загасання оптичного сигналу в ОВ , дБ/км
- Параметри, що оцінюють пропускну здатність:
 - для багатомодових ОВ - коефіцієнт широкосмуговості в Мгц · км;
 - для одномодових ОВ – коефіцієнт хроматичної дисперсії в (пс · км)/нм, нахил кривої дисперсії (пс · км)/нм².

Загасання оптичного сигналу в оптичному волокні

Фактори, що впливають на загасання оптичного сигналу в оптичному волокні, показані на рисунку 1.2.4.

Загасання сигналу в ОК визначається власними втратами ОВ (поглинанням, розсіюванням, випромінюванням) та втратами, пов'язаними з монтажем кабелю, при згинанні, при прокладанні кабелю, з технологією виробництва кабелю (мікровигини).

На макро- і мікровигинах відбуваються втрати оптичного сигналу в ОВ за рахунок порушення геометрії проходження сигналу, з'являються витікаючі моди. Тому для ОВ і ОК існують допустимі *радіуси вигину*.

Також при розповсюдженні оптичного сигналу по ОВ виникають явища Релеєвського розсіювання та Френелівського відбиття. Рівень сигналів Френелівського відбиття, як правило, на 20-30 дБ більше, ніж сигналів Релеєвського розсіювання.

Релеєвське розсіювання виникає на частинках, розміри яких набагато менше довжини хвилі. Частинки випромінюють поглинутий сигнал у всі сторони. На аналізі сигналів Релеєвського розсіювання побудований принцип дії *оптичних рефлектометрів*.

Френелівське відбиття, в свою чергу, виникає від частинок, розміри яких більше довжини хвилі.

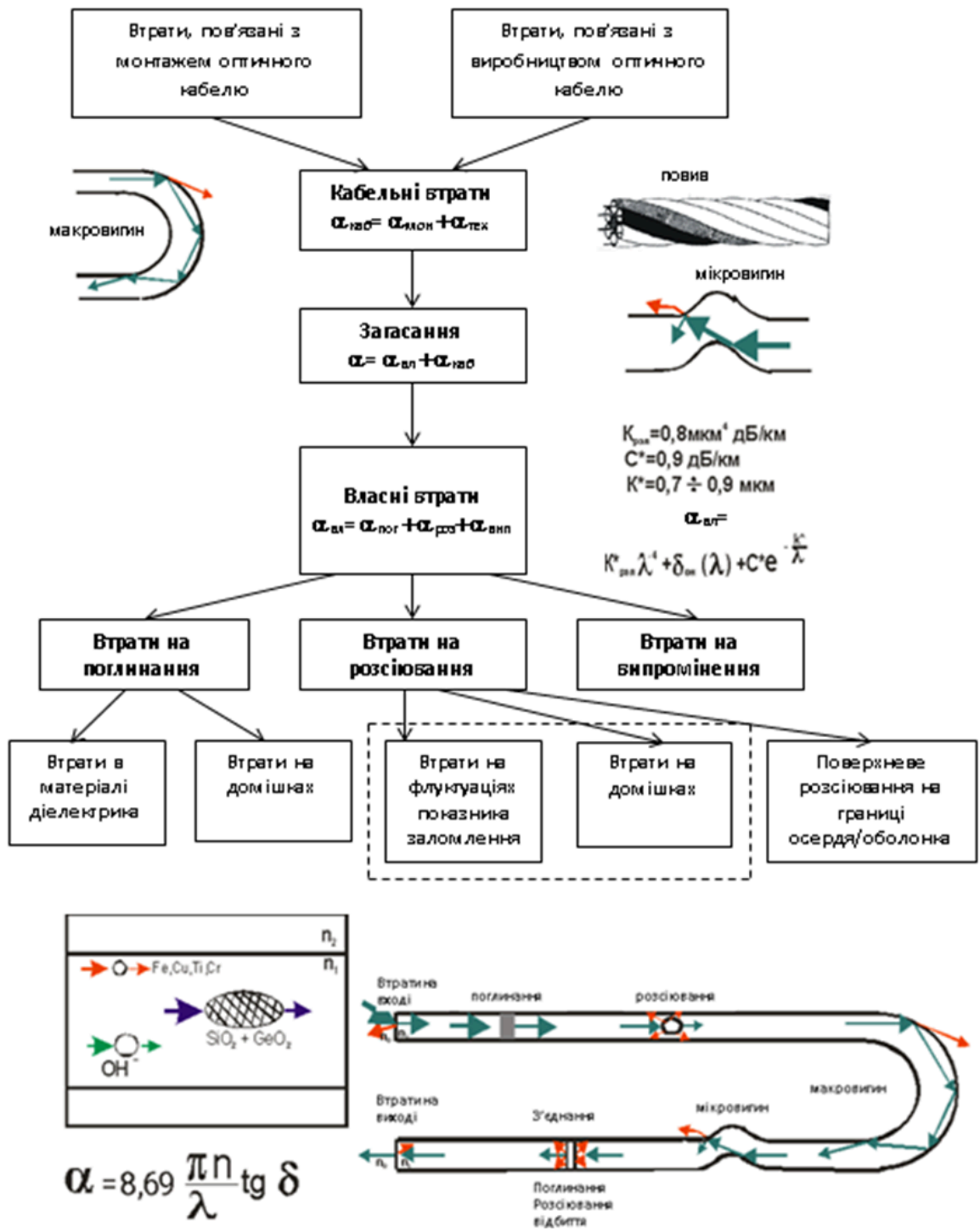


Рис.1.2.4 Загасання оптичного сигналу в ОВ (ОК)

Явище дисперсії в оптичному волокні

Дисперсія обмежує довжину регенераційної ділянки у ВОСП.

Дисперсія - це розсіювання опт.сигналу у часі за довжинами хвиль.

Дисперсія призводить до уширення імпульсу, тобто спотворення, до міжсимвольної інтерференції та збільшення коефіцієнту помилок. Складові дисперсії показані на рисунку 1.2.5.

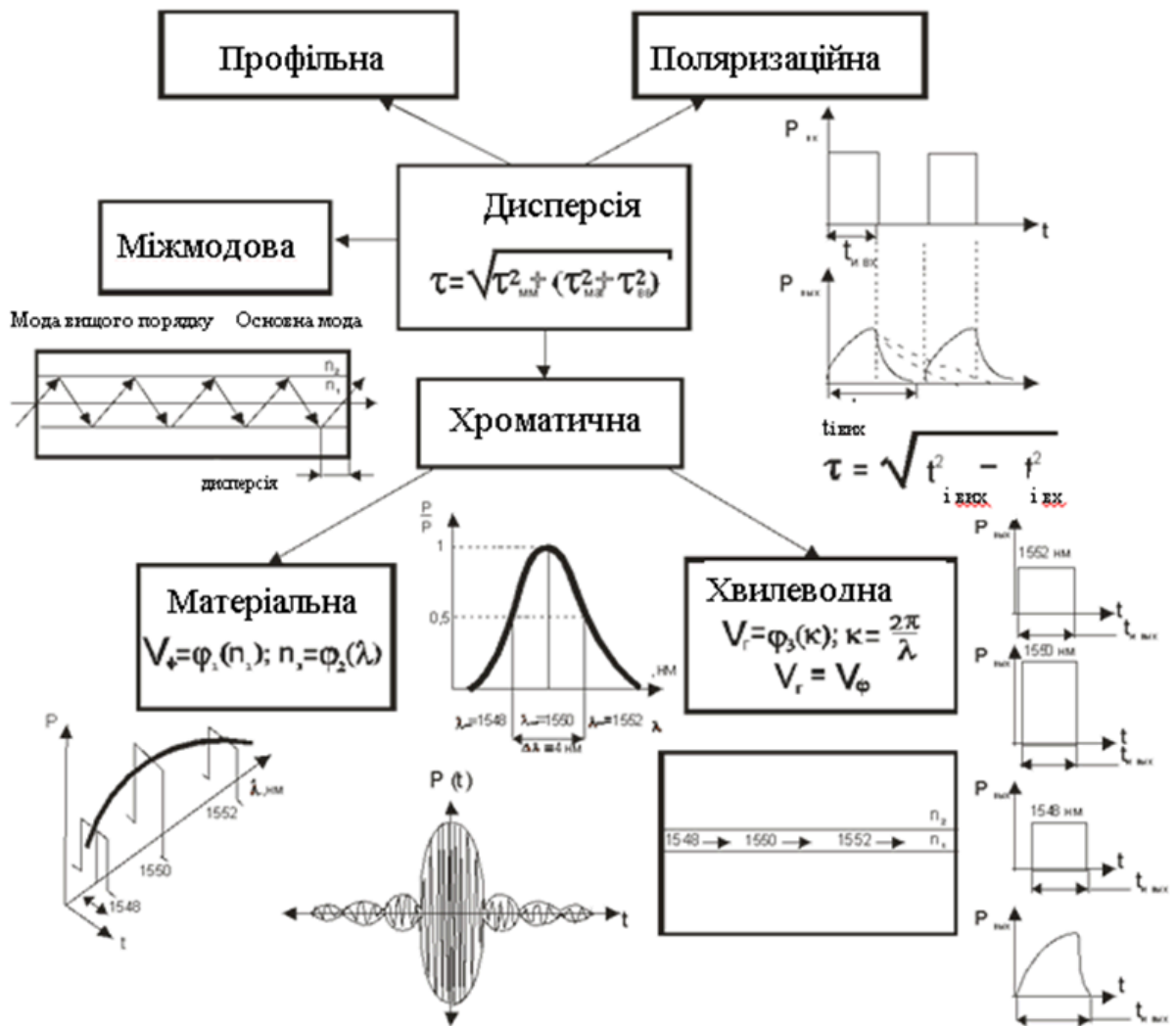


Рис. 1.2.5 Дисперсія оптичного сигналу в ОВ

Причини дисперсії:

1. диспергуюче середовище, тобто особливості структури ОВ
2. некогерентність джерела випромінювання, тобто кінцева ширина спектру випромінювання
3. показник заломлення, та його зміни
4. недосконалість конструкції ОВ, тобто еліптичність серцевини (ПМД)

Матеріальна дисперсія - це залежність швидкості розповсюдження променя (хвилі) від довжини хвилі або залежність показника заломлення від довжини хвилі.

Хвильоводна (внутрішньомодова) дисперсія обумовлена процесами всередині моди і характеризується залежністю групової швидкості моди від довжини хвилі.

Визначається профілем показника заломлення ОВ і пропорційна ширині спектра випромінювання джерела.

Для компенсації хроматичної дисперсії використовують компенсатори хроматичної дисперсії.

Суперпозиція декількох хвиль з різними довжинами утворює групу хвиль, хвильовий пакет або імпульс. Швидкість групи або групова швидкість - це швидкість руху максимуму огинаючої амплітуди хвиль. Дисперсію викликає відмінність групової швидкості від фазової, тобто огинаюча та окремі складові хвилі рухаються з різними швидкостями.

Поляризаційна модова дисперсія (ПМД) (рис.1.2.6) виникає завдяки різній швидкості розповсюдження двох взаємно перпендикулярних складових випромінювання E_x та E_y . Також призводить до спотворення імпульсу.

Причиною ПМД є еліптичність серцевини, конструктивна недосконалість, все, що пов'язано з неправильною геометрією. Наприклад: ПМД може бути обумовлена добовими стрибками температури, зміна геометричних параметрів при надмірному стисканні, скручуванні і т.п.

На ПМД потрібно зважати при швидкостях більше 10 Гбіт/с.

Накопичується в лінії статистично як корінь квадратний із довжини лінії.

$$PMD = k_{PMD} \sqrt{L}, \text{ де } k_{PMD} \text{ коефіцієнт ПМД в пс/км}^{1/2}$$

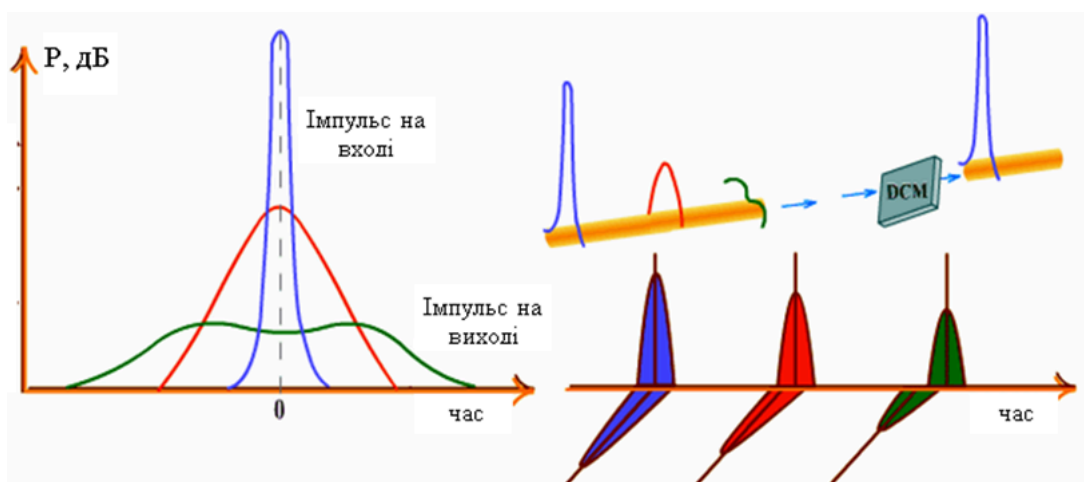


Рис. 1.2.6 Поляризаційна модова дисперсія в ОВ

1.3 Типи оптичних волокон

Типи оптичних волокон та їх параметри регламентуються Міжнародним Союзом електрозв'язку ІТУ-Т, групою G [14-18]. Напрацювання ІТУ-Т випускаються у вигляді Рекомендацій Міжнародного Союзу електрозв'язку.

Рекомендація G.651 - Параметри багатомодового ОВ

На $\lambda=850$ нм $\alpha=2,5$ дБ/км, Кширокосмуговості=500 МГц·км.

На $\lambda=1300$ нм $\alpha=0,5\dots0,7$ дБ/км, Кширокосмуговості=1200...2000 МГц·км.

Діаметр серцевини $D_s=50$ або 62,5 мкм.

Діаметр оболонки $D_o=125$ мкм.

Діаметр пластикової оболонки $D_{зовн}=250$ мкм.

Багатомодові волокна G.651 мають градієнтний профіль показника заломлення (рис.1.3.1).

Більший, порівняно з одномодовим, діаметр серцевини багатомодового ОВ і більша числова апертура полегшує його монтаж та експлуатацію. Основним недоліком такого волокна є наявність міжмодової дисперсії, що виникає через те, що різні моди проходять у волокні різний оптичний шлях. Для зменшення впливу цього явища було розроблено багатомодове волокно з градієнтним профілем показником заломлення (рис.1.3.1). З рисунка видно, що за рахунок зменшення показника заломлення від осі ОВ до оболонки швидкість поширення променів збільшується. Таким чином відбувається вирівнювання швидкостей для променів (мод), що розповсюджуються під різними кутами.

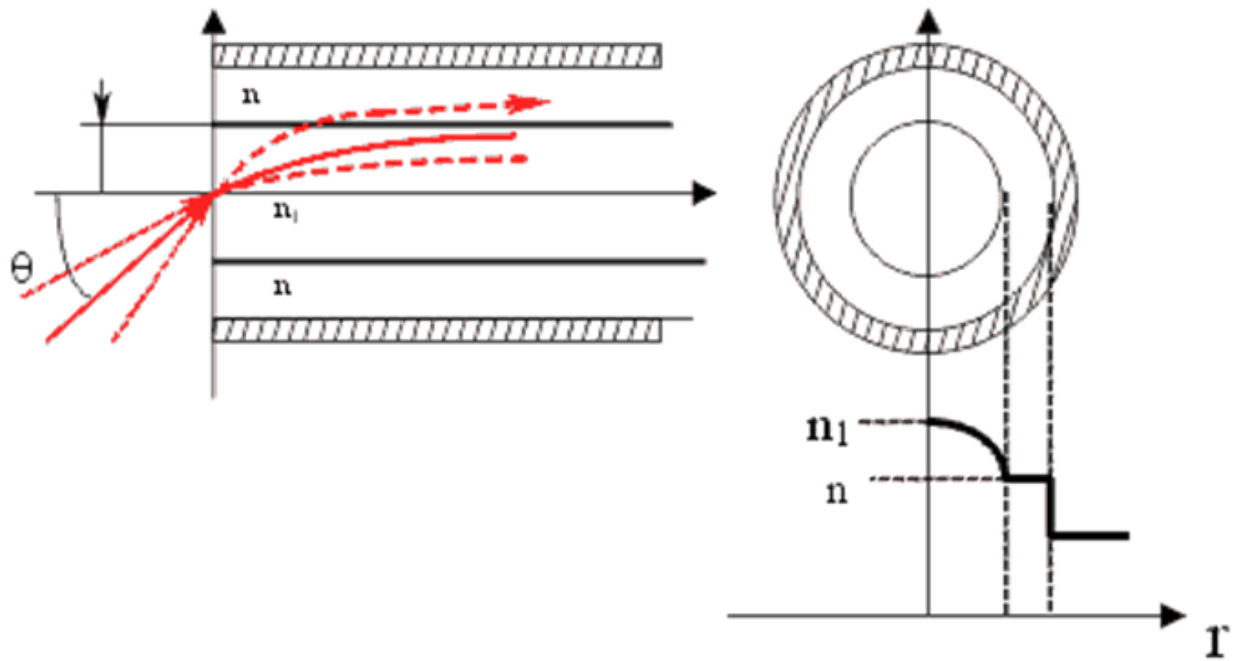


Рис.1.3.1 Багатомодове волокно з градієнтним профілем показника заломлення

G.652 Параметри стандартного одномодового ОВ (ОМ ОВ) SMF- Single Mode Fiber або (SSF - Standard Single Mode Fiber)

На $\lambda=1310$ нм $\alpha=0,35$ дБ/км, коефіцієнт хроматичної дисперсії $K_{xp} \approx 0$.

На $\lambda=1550$ нм $\alpha=0,2$ дБ/км, $K_{xp}=16...18$ пс/(нм·км); для компенсації значної хроматичної дисперсії використовуються компенсатори хроматичної дисперсії.

Одномодові ОВ G.652 мають сходинковий профіль показника заломлення (рис.1.2.2).

Діаметр серцевини $D_s=8...10$ мкм. Наприклад: напис “9/125” на патчкорді означає: 9 - діаметр серцевини, 125 - діаметр оболонки.

Діаметр оболонки $D_o=125$ мкм.

Діаметр пластикової оболонки $D_{зовн}=250$ мкм.

Для ОВ G.652 на $\lambda < 1260$ нм буде спостерігатися багатомодовий режим.

G.653 ОМ ОВ зі зміщеною нульовою дисперсією (DSF – Dispersion Shifted Fiber)

На $\lambda=1550$ нм $\alpha=0,2$ дБ/км, коефіцієнт хроматичної дисперсії $K_{xp}=0$ за рахунок зміни профілю показника заломлення.

Цей тип ОВ годиться для використання на довгих регенераційних ділянках, проте не годиться для систем DWDM.

Поява технологій мультиплексування за довжиною хвилі поставило питання, які типи ОВ будуть ефективно працювати з такими технологіями. Інформація щодо цього наведена нижче.

Технології мультиплексування за довжиною хвилі

Транспортні системи передачі для збільшення пропускної здатності ОВ використовують системи DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing – мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі (або ще назва – системи зі спектральним розділенням каналів - СРК).

Системи WDM використовують здатність ОВ **одночасно** передавати сигнали різних довжин хвиль в ОВ. Кожна довжина хвилі представляє собою окремий **оптичний канал** в ОВ. Наприклад, в ОВ передається 80 оптичних каналів×10 Гбіт/с=800 Гбіт/с.

У Рекомендації **G.694.1** [21] наданий **частотний план DWDM** – це набір стандартних частот на основі базової $f=193\,100$ ГГц=193,1 ТГц; стандартні частоти розташовуються нижче і вище базової з кроком

$$\Delta f = \pm 100 \text{ ГГц}, 50 \text{ ГГц}.$$

Системи HDWDM мають крок між сусідніми оптичними каналами 25 ГГц або 12,5 ГГц -

По довжині хвилі крок 100 ГГц відповідає **≈0,8 нм**, а крок 50 ГГц - **≈0,4 нм**.

Прикладом системи DWDM є платформа компанії Cisco ONS 15454. Для нумерації оптичних каналів у цій платформі використовуються середні цифри з довжини хвилі каналу: **1550,24**

Системи DWDM працюють в С- та L-діапазонах: 1530-1560 нм (С-діапазон) і 1565-1625 нм (L-діапазон), вимагають використання оптичних підсилювачів, тому що використання DWDM-мультиплексорів та демультимплексорів, які є пасивними компонентами, призводить до значних втрат сигналу.

Рекомендація G.692 - діапазони роботи ОВ в системах WDM - О (1260-1360 нм), E, S, C, L, U-діапазони.

У діапазоні С з кроком $\Delta f = \pm 100$ ГГц можна організувати 40 оптичних каналів, які нумеруються в залежності від частоти каналу згідно частотного плану наступним чином:

21 опт. канал 192,1 ТГц

....

31 опт. канал 193,1 ТГц

....

60 опт.канал 196,0 ТГц

У діапазоні С з кроком $\Delta f = \pm 50$ ГГц можна організувати 80 оптичних каналів.

Системи CWDM (Coarse-грубий) мають максимально 18 оптичних каналів з кроком 20нм.

У Рекомендації **G.694.2** [22] наданий **план довжин хвиль** CWDM, оптичні канали: 1270нм, 1290, 1310, 1330, 1350, 1370, 1390, 1410, 1430, 1450, 1470, 1490, 1510, 1550, 1570, 1590, 1610 нм.

В ОВ **G.652** можна організувати до восьми оптичних каналів 1450, 1470, 1490, 1510, 1550, 1570, 1590, 1610 нм.

В ОВ **G.653** із-за нульової дисперсії виникає нелінійний ефект 4-х хвильового змішування (виникнення комбінаційних частот каналів DWDM), тому цей тип ОВ не годиться для DWDM.

Спеціально для DWDM систем було розроблено ОВ **G.655**.

G.655 - ОВ зі зміщеною НЕнульовою дисперсією (NZDSF – Non Zero Dispersion Shifted Fiber), виробляють оптичні волокна NZDSF⁺ та NZDSF⁻, тому можлива побудова ВОЛЗ з чередуванням відрізків ліній з додатним і від'ємним коефіцієнтом хроматичної дисперсії.

На $\lambda = 1550$ нм $\alpha = 0,2$ дБ/км, $K_{xp} = 0,1 \dots 6$ пс/(нм·км) за рахунок зміни профілю показника заломлення.

ОВ G.652 використовується для DWDM систем, але з компенсаторами хроматичної дисперсії.

Для технологій пасивних оптичних мереж PON – Passive Optical Network, FTTx-Fiber to the x (Home, Corb, Building...) використовуються волокна G.656, G.657.

Технологія пасивних оптичних мереж передбачає побудову волоконної лінії без проміжних активних компонентів. У оператора на станції розташовується обладнання OLT - Optical Line Terminal, а у абонентів - ONT (ONU) - Optical Network Terminal (Unit). Потік до абонента Downstream використовує довжину хвилі 1470 nm і є мультиадресним (multiaddress). Потік від абонента до станції Upstream (до OLT) використовує довжину хвилі 1310 nm та розділення передачі інформації кожним абонентським пристроєм у часі TDMA –Time Division Multiple Access.

G.656 - OM OB з ненульовою дисперсією для широкопasmової передачі.

G.657 - OM OB зі зменшеними втратами на вигинах з малими радіусами. Параметри цього волокна представлені у таблиці 1.3.1.

Таблиця 1.3.1

Параметр	ITU-T G.657.A	ITU-T G.657.B
Втрати на вигинах 1 виток Ø15мм @1550nm	Не нормується	≤0.5 дБ
Втрати на вигинах 1 виток Ø15мм @1625nm	Не нормується	≤1 дБ
Втрати на вигинах 1 виток Ø20мм @1550nm	≤0.75 дБ	≤0.1 дБ
Втрати на вигинах 1 виток Ø20мм @1625nm	≤1.5 дБ	≤0.2 дБ
Втрати на вигинах 10 витків Ø30мм @1550nm	≤0.25 дБ	≤0.03 дБ
Втрати на вигинах 10 витків Ø30мм @1625nm	≤1 дБ	≤0.1 дБ

Діаметр модового поля, μm	8.6-9.5	6.3-9.5
Загасання на довжині хвилі 1310нм, дБ/км	≤0.35	≤0.35
Загасання на довжині хвилі 1383нм, дБ/км	≤0.31	Не нормується
Загасання на довжині хвилі 1550нм, дБ/км	≤0.21	≤0.21

Для CWDM (Coarse WDM) використовується волокно Zero Water Peak Fiber (G.652C/D) (рис.1.3.2). В цьому ОВ збільшення загасання за рахунок іонів гідроксильної групи OH^- (так званий «водяний пік» на довжині хвилі 1383 нм) скомпенсовано - червона крива на рисунку. При цьому можна використовувати всі 18 оптичних каналів згідно плану довжин хвиль G.694.2. Зі звичайним ОВ G.652 використовується до восьми каналів з довжинами хвиль, зазначеними вище. Відстань між каналами 20нм, **не** використовуються оптичні підсилювачі, дешеві лазерні діоди, в яких допускається ухід довжини хвилі ± 5 нм.

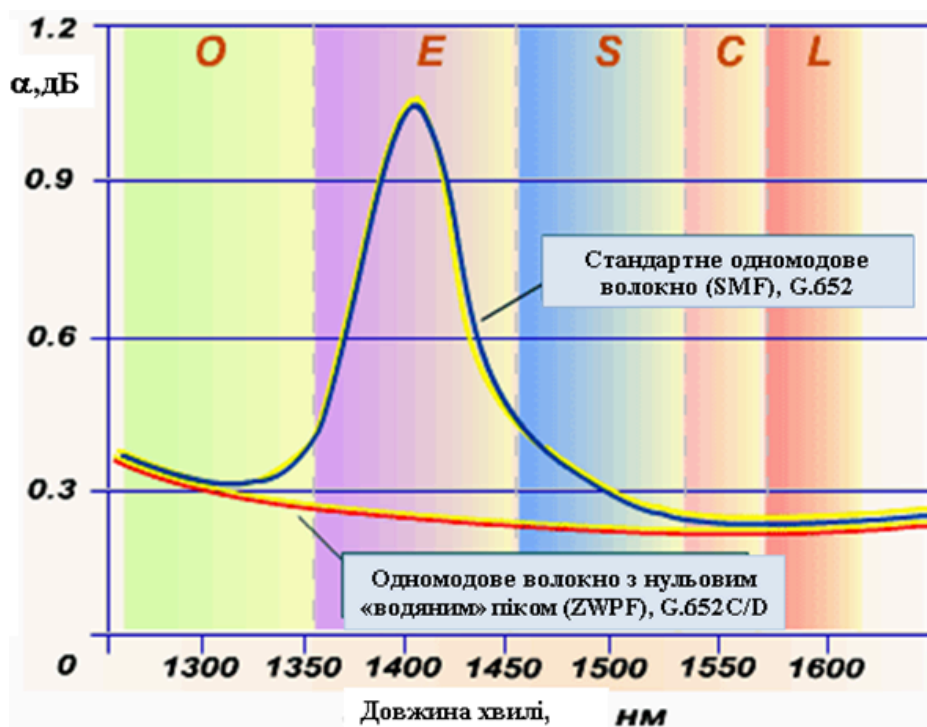


Рис.1.3.2 Оптичне волокно Zero Water Peak Fiber (G.652C/D)

1.4 Оптичні кабелі. Конструкція оптичних кабелів

ОК поділяють за низкою ознак: призначення та умови застосування, конструктивні та технологічні особливості, число ОВ та електричних жил.

ОК можна розділити на кабелі для зовнішньої (лінійні кабелі) та внутрішньої (внутрішньооб'єктові кабелі) прокладки.

За умовами застосування кабелі поділяються на підвісні, підземні (у ґрунті, в кабельній каналізації, в тунелі) та підводні.

Основне призначення елементів конструкції ОК полягає в тому, щоб зберігати характеристики передачі і механічну міцність волокон стабільними в процесі виготовлення, прокладання та експлуатації кабелю, тобто ОК повинні мати механічну міцність і хімічну стійкість.

До факторів, що враховуються при конструюванні ОК, належать:

- механічні характеристики та характеристики навколишнього середовища,
- довгострокова надійність,
- легкість виконання робіт з прокладання та зрощування,
- застосування на мережі.

Узагальнена конструкція оптичного кабелю показана на рисунку 1.4.1.

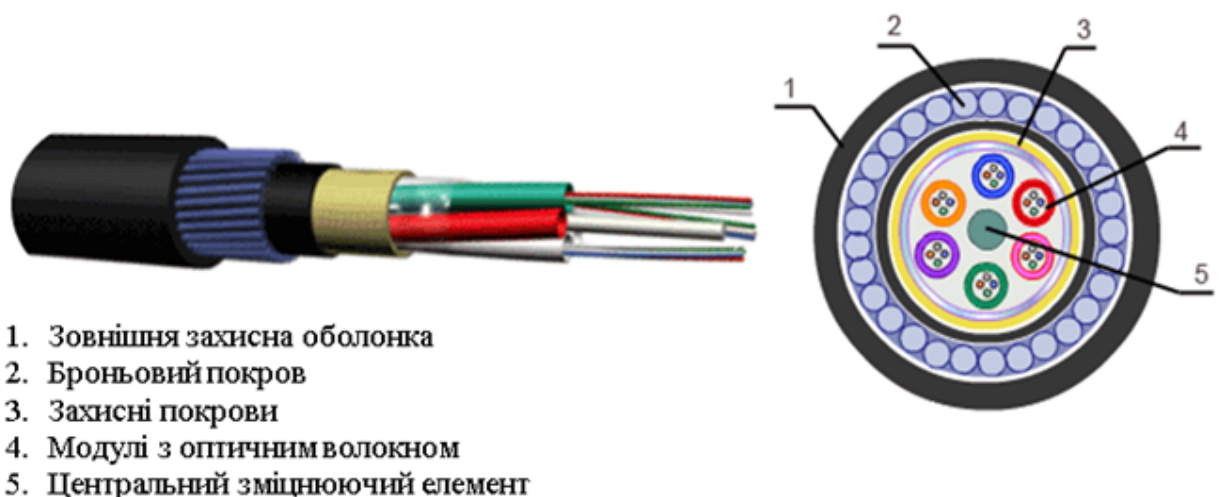


Рис.1.4.1 Узагальнена конструкція оптичного кабелю

Можна виділити кілька основних груп конструктивних елементів оптичних кабелів:

- ОВ із захисними покриттями,
- сердечники,
- силові елементи,
- гідрофобні або гідрофільні матеріали,
- оболонки та броня.



Рис.1.4.2 Конструкція ОК зі склопластиковими стрижнями по периферії [1]

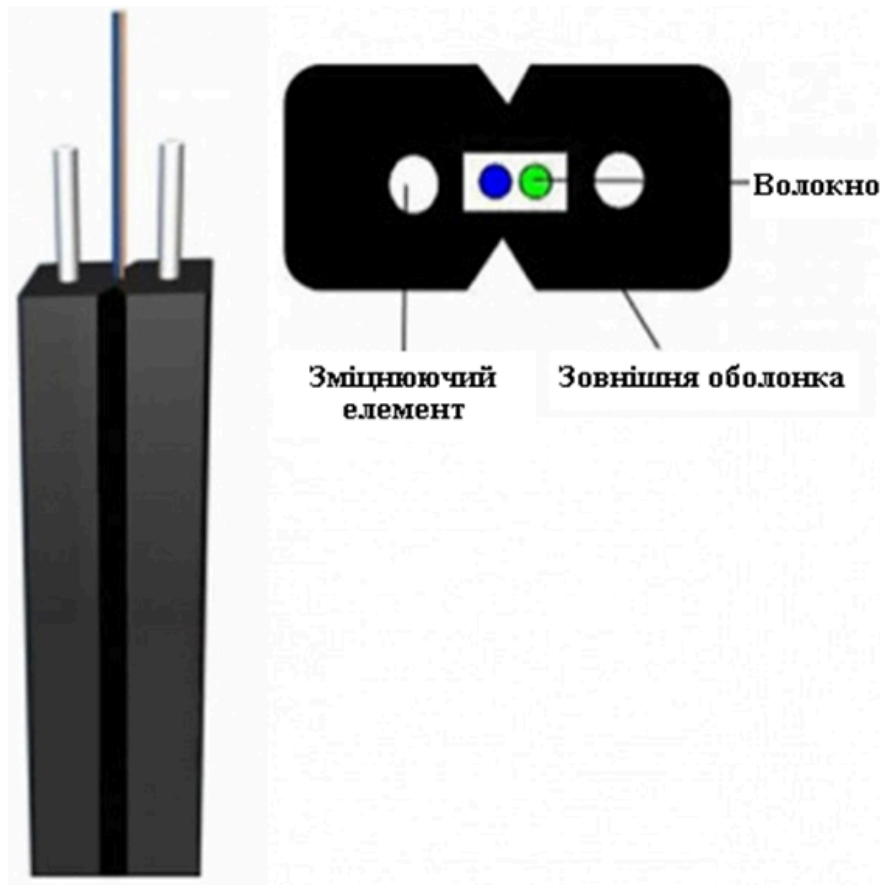


Рис.1.4.3 Конструкція ОК для FTTH [2]

Як правило, для первинного покриття ОВ застосовують акрилат або силіконову смолу. Для полегшення ідентифікації волокон первинне покриття фарбується.

ОВ, що мають первинне покриття, можуть бути захищені вдруге:

- за допомогою вільного укладання всередині трубки або в пазу,
- за допомогою щільного покриття з полімеру,
- за рахунок використання стрічково-полімерної конструкції.

Гідрофобні та гідрофільні матеріали перешкоджають проникненню вологи в ОК та сприяють збільшенню терміну служби ОВ. Як правило, це спеціальний гідрофобний наповнювач. Гідрофільна стрічка має властивість розбухати при попаданні води. Може використовуватись комбінація цих матеріалів. Вільний простір в оптичних модулях (ОМ), пазах, а також між ОМ заповнюється гідрофобним компаундом. Гідрофобна стрічка використовується для обмотки ОМ та сердечників ОК. Застосовується безперервне та дискретне заповнення гідрофобним компаундом.

Серце ОК формується з одного (сердечник малої ємності) або кількох (сердечник великої ємності) ОМ. Використовуються конструкції сердечників з невеликим (менше 100) та з більшим (більше 100) числом ОВ.

Силові елементи вводяться в ОК для того, щоб забезпечити необхідну міцність ОК і не допустити великих напруг в ОВ. Як матеріали для силових елементів застосовують сталевий дріт, а також арамідні нитки та склопластикові стрижні.

Силові елементи розміщують у центрі (рис.1.4.1) – для більшої гнучкості та на периферії (рис.1.4.2) – для більшої стійкості ОК до ударів та зусиль, що розтягують.

Оболонки ОК призначені для захисту осердя ОК від зовнішніх впливів та механічних пошкоджень. Поділяються на п'ять типів:

- о металева/пластмасова оболонка з металевими стрічками або металевим шаром,
- о пластмасова оболонка,
- о пластмасова оболонка з силовими елементами,
- о пластмасова оболонка, в яку впресовані силові елементи з металевою стрічкою,
- о броньована оболонка кабелю.

Конструкція ОК LANKORE UT 012 ADSS 1,0кН зображена на рис.1.4.2. Кабель використовується для прокладки в кабельній каналізації і для підвісу на опорах, має діелектричну конструкцію (ADSS), силовий елемент - 2 склопластикових прутка, зовнішня оболонка з поліетилену, навантаження на розтяг - 1,0 кН.

Конструкція ОК FTTH-002-SM зображена на рис.1.4.3. Використовується в мережах FTTH, має зовнішнє покриття LSZH, два силових елемента, хороший радіус вигину, кабельне покриття з безгелогенового і малодимного матеріалу.

Розглянемо приклади маркування оптичних кабелів виробництва ВАТ «Одесакабель»:

ОКК-50-01-0,7-8 це кабель міського зв'язку,

К – для прокладання в каналізації,

- 50 – діаметр серцевини (ММ волокно),
- 01 – модифікація кабелю – центральний елемент зі склопластику,
- 0,7 - коефіцієнт загасання, дБ/км,
- 8 – число ОВ.

Контрольні питання

1. Перерахувати переваги ОВ у порівнянні з іншими середовищами передачі
2. Структура ОВ
3. В чому полягає явище повного внутрішнього відбиття і як досягти повного внутрішнього відбиття
4. Підрахувати частоти, на яких працює ОВ
5. Підрахувати загасання в ОВ на відстані 80 км на довжині хвилі 1550 нм
6. Назвіть типи ОВ, а саме : назву та рекомендацію МСЕ-Т
7. Записати параметри стандартного одномодового опт.волокна
8. Геометричні параметри одномодового та багатомодового ОВ
9. Пояснити ефект “загасання” оптичного сигналу в ОВ, тобто як в цьому упевнитись
10. Перерахувати причини, за рахунок яких оптичний сигнал загасає в ОВ
11. Пояснити явище Релеєвського розсіювання і чому воно є важливим при роботі з ОВ
12. Чому мікро- і макровигини призводять до загасання опт.сигналу в ОВ?
13. В яких одиницях вимірюється загасання і коефіцієнт загасання?
14. Чим обмежується довжина регенераційної ділянки волоконно-оптичної лінії зв'язку?
15. Пояснити явище дисперсії і до чого воно призводить
16. Чому на вашу думку найбільший внесок в загальну дисперсію вносить міжмодова дисперсія?
17. Параметри хроматичної дисперсії та їх одиниці вимірювання
18. Перерахувати причини виникнення дисперсії
19. Що розуміють під явищем поляризаційної модової дисперсії та причини її появи

20. Чому потрібно використовувати компенсатори хроматичної дисперсії в діапазоні 1550 нм?
21. Які типи ОВ використовуються для пасивних оптичних мереж PON і чому?
22. В чому полягає ефект 4-х хвилевого змішування?
23. Для якого типу ОВ проявляється ефект 4-х хвилевого змішування і чому?
24. Призначення конструкції оптичних кабелів

Практична робота 1

Вивчення конструкції та параметрів оптичних кабелів, оптичних волокон

Мета роботи:

Розглянути конструкцію та призначення конструктивних елементів оптичних кабелів (ОК), типи ОК, параметри ОК та оптичних волокон (ОВ) відомих виробників. Визначити параметри, що впливають на якість передачі оптичного сигналу оптичним волокном.

Порядок виконання роботи:

1. Користуючись Інтернет ресурсами відомих виробників ОК розглянути типи ОК, їх конструктивні особливості та параметри ОК, що надаються виробником. Результати вивчення представити у звіті.
2. Також за даними відомих виробників ОВ розглянути геометричні, передавальні, міцнісні параметри ОВ, що надаються виробником. Результати вивчення представити у звіті. Зробити висновки щодо відповідності параметрів нормам Рекомендацій МСЕ.
3. За результатами роботи визначити параметри, що впливають на якість передачі оптичного сигналу оптичним волокном. Надати пояснення.

У звіті представити:

1. Вигляд конструкції та призначення конструктивних елементів одного типу оптичного кабелю та зазначити його параметри, що надаються виробником.

2. Геометричні, передавальні, міцнісні параметри одного типу ОВ, що надаються виробником. Зробити висновки щодо відповідності параметрів нормам Рекомендацій МСЕ.
3. Пояснення щодо впливу параметрів ОВ на якість передачі оптичного сигналу оптичним волокном.

Розділ 2 Пасивні компоненти ВОЛТ

Пасивні компоненти ВОЛТ (не потребують додаткової енергії для виконання своїх функцій):

- ОВ, ОК
- Оптичні розгалужувачі та відгалужувачі (спліттери)
- Оптичні фільтри
- Оптичні з'єднувачі (конектор-адаптер)
- Оптичні мультиплексори/демультиплексори
- OADM-Optical Add/Drop Multiplexor (Оптичні мультиплексори

введення/виведення)

- Оптичні Атенюатори
- Оптичні ізолятори

Одиниці вимірювання, що застосовуються у волоконній оптиці

Оптична потужність вимірюється в мкВт, мВт. Рівень оптичної потужності вимірюється в дБм та дБ. Розрізняють абсолютний і відносний рівень оптичної потужності. Абсолютний рівень - відносно значення 1 мВт, а відносний - по відношенню до будь-якого значення.

Абсолютний рівень в дБм, dWm:

$$p=10 \lg(P_{\text{вим}}/P_0),$$

де $P_{\text{вим}}$ - потужність, що вимірюється, $P_0=1\text{мВт}$.

Відносний рівень в дБ, dB:

$$p=10 \lg(P_2/P_1),$$

де P_2 - потужність, що вимірюється, а P_1 - потужність для порівняння.

Збільшення оптичної потужності **в 2 рази** відповідає збільшенню рівня потужності **на 3 дБ**.

Знаючи, що $\lg 2=0,3$, $\lg 1=0$, можна скласти таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Рівень потужності в дБм	Потужність в мВт
30	1000
20	100
9	8
6	4
+3 дБм	2
0	1 мВт
- 3 дБм	0,5
- 6	0,25
-7	199 мкВт≈0,2
-9	0,125

2.1 Оптичні розгалужувачі та відгалужувачі (спліттери)

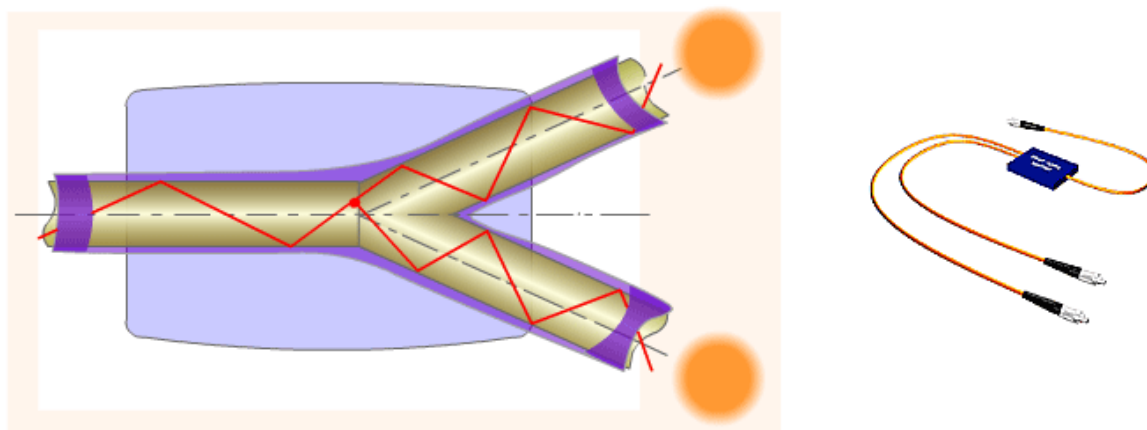


Рис.2.1.1 Оптичний розгалужувач (спліттер)

Оптичний розгалужувач (спліттер) - це пасивний оптичний елемент, який розподіляє потік оптичного випромінювання на кілька волокон в одному напрямку і об'єднує кілька потоків у зворотному напрямку.

Розгалужувач $M \times N$ - це розгалужувач, у якого M вхідних та N вихідних портів.

Виготовляється розгалужувач зварюванням світловодів та конструктивно виконаний у більшості випадків у вигляді корпусу із сполучними шнурами.

Розрізняють спрямовані та двоспрямовані, а також розгалужувачі, чутливі до довжини хвилі (селективні) та нечутливі (неселективні).

У двонаправленому розгалужувачі кожен полюс може працювати або прийом сигналу, або на передачу, або здійснювати прийом і передачу одночасно, так що групи приймальних і передавальних полюсів можуть змінюватися місцями у функціональному сенсі.

Приклад відгалужувача показаний на рис.2.1.2.

Одномодовий відгалужувач - призначений для поділу оптичної потужності та передачі сигналу в кількох напрямках по одномодовому волокну.

У таблиці 2.1.1 наведено дані на розподіл оптичної потужності з рівним коефіцієнтом розгалуження.

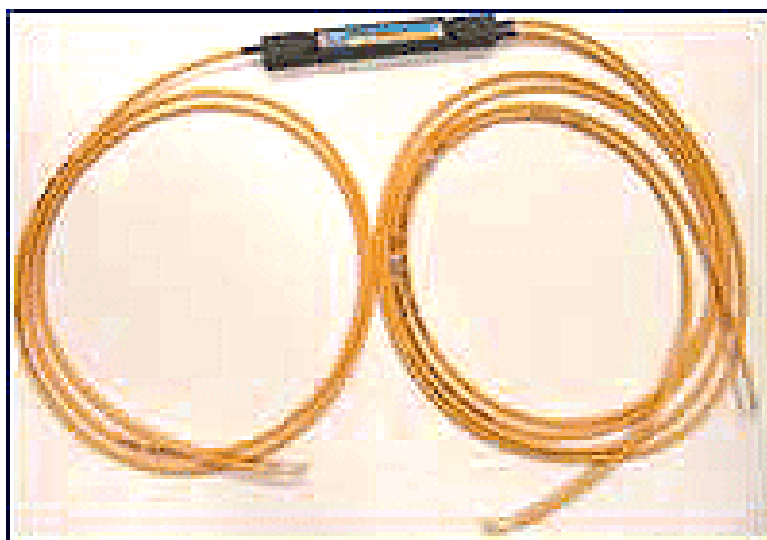


Рис.2.1.2 Приклад одномодового відгалужувача

Таблиця 2.1.1

Якість	S	A	B	A	B	A	B	A	B
Конфігурація	1x2, 2x2			1x3, 3x3		1x4, 4x4		1x8, 8x8	
Довжина хвилі	1310 nm або 1550 nm, 1310&1550nm								
Типові втрати (dB)	0.07	0.1	0.15	0.25	0.3	0.3	0.5	0.5	0.9
Максимальне вносиме загасання (dB)	3.4	3.7	4.3	5.5	5.7	6.8	7.2	10	11
PDL (dB)	<0.1								

2.2 Оптичні з'єднання

З'єднання оптичних волокон можна розділити на роз'ємні та нероз'ємні.

Методи з'єднання оптичних волокон:

- термічним способом – методом зварювання отримують нероз'ємні з'єднання,
- за допомогою механічного контакту отримують роз'ємні з'єднання:
 - механічні з'єднувачі (сплайси),
 - оптичні роз'єми (роз'ємні з'єднувачі).

Метою зварювання є створення постійного з'єднання оптичних волокон ОК з низькими втратами передачі оптичного випромінювання через місце з'єднання.

Відмінною особливістю механічних з'єднувачів є можливість багаторазового зчленування (більше 10) оптичних волокон, що особливо важливо при створенні тимчасового з'єднання ОК в процесі усунення несправностей лінії, а також при підключенні вимірювальних приладів.

Роз'ємні з'єднувачі (РС) допускають багаторазове складання та розбирання (не менше 100 циклів) без погіршення параметрів і застосовуються в оптичних кросах та для підключення до кабелю обладнання.

Механічний з'єднувач є прецизійним оптомеханічним пристроєм, що самоюстується. Це саме стосується і оптичного роз'єму.

Основні вимоги до з'єднувачів:

- мінімальні втрати, що вносяться до тракту поширення оптичного сигналу,
- низькі зворотні втрати,
- довготривала стабільність (велика кількість циклів включення-відключення для роз'ємних),
- простота виготовлення чи встановлення.

Зварні з'єднання

Для зварних з'єднань типовий діапазон втрат, що досягаються, становить 0,02-0,1 дБ як для одномодових, так і для багатомодових волокон.

Зварювання ОВ - це найбільш широко використовуваний метод зрощування, так як він забезпечує менші втрати і відбивну здатність, міцне і більш надійне з'єднання двох волокон. При використанні цього методу застосовуються спеціальні зварювальні апарати [4].

В даний час одержання гарного зростка спростилося завдяки постійному прогресу зварювального обладнання, процедур зварювання – з одного боку та постійному поліпшенню геометричних параметрів волокна – з іншого боку.

На якість зварного з'єднання впливають безліч факторів, серед яких основними є

- втрати зростка, що вносяться,
- міцність на розтяг.

Ці параметри визначаються розбіжністю діаметрів волокон і числових апертур, розбіжністю показників заломлення, неконцентричністю серцевини та оболонки. Крім того, у процесі зрощування можуть виникати поздовжні та кутові зміщення, забруднення та деформація сердечника, проте вплив цих факторів може бути зведений до мінімуму за рахунок використання сучасних автоматичних зварювальних апаратів та навченого персоналу.

Процес створення зростка складається із трьох етапів:

- підготовки волокон – видалення оболонки, видалення забруднення з очищених поверхонь та сколу очищених волокон;
- безпосередньо процесу зварювання та оцінки якості зварного з'єднання;
- захисту оголеної ділянки волокна від механічного тиску та впливу навколишнього середовища за допомогою герметичної оболонки – термозбіжної гільзи.

Процес зварювання полягає в зближенні волокон з попередньо підготовленими торцевими поверхнями на задану відстань, центруванні осей волокон вздовж осі абсцис і подальше створення дугового розряду між електродами (рис.2.2.1). При цьому підготовка торцевих поверхонь здійснюється сколювачем, параметри якого мають велике значення, оскільки вони визначають перпендикулярність отриманої в результаті сколу поверхні до осі волокна, що є істотним фактором при зварюванні ОВ.

При розплавленні волокна є два важливі кроки: вирівнювання і плавлення. Перш за все, необхідно вирівняти кінці волокна всередині волоконно-оптичного зварювача. Як тільки буде досягнуто правильне вирівнювання, використання електричної дуги для розплавлення волокон призводить до постійного зварювання двох кінців волокон разом.

Типовий зварений шов має межу міцності на розрив від 0,5 до 2 N [4], і його нелегко зламати при правильній експлуатації. Однак, цей шов все ж вимагає захисту від надмірних навантажень на згин і розтягнення. При використанні термозбіжних гільз силіконовий гель і/або механічні обтискні захисні пристосування захистять зварений шов від зовнішніх елементів і пошкоджень.

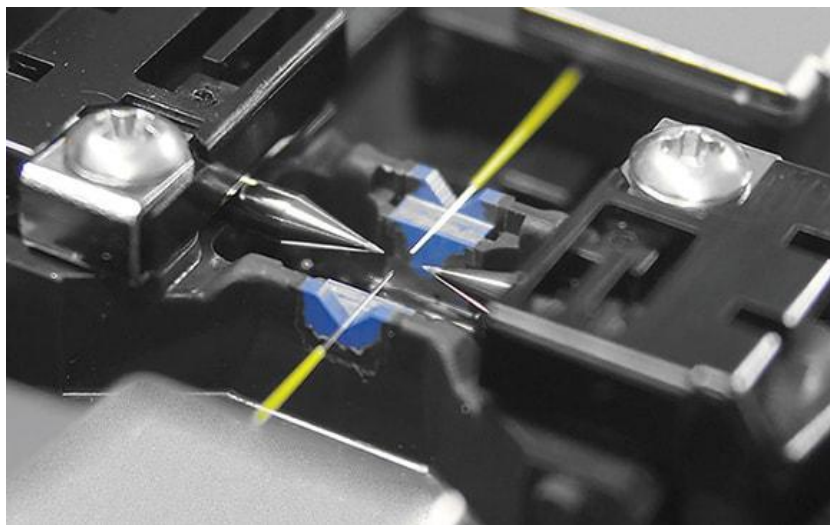


Рис.2.2.1 Процес зварювання [4]

Цикл зварювання оптичного волокна автоматичного зварювального апарату [4]

Метод Lid є найбільш ефективним, оскільки, на відміну від методу Pas, якість зварного з'єднання в більшій мірі залежить від зварювального апарату, а не від індивідуальної майстерності персоналу. В сучасних зварювальних апаратах для управління процесами юстирування і зварювання використовуються мікропроцесори, за допомогою яких можлива оптимізація процесу зварювання для отримання мінімальних (менше 0,1 дБ) втрат в місцях з'єднань оптичних волокон.

В процесі оплавлення оптичні волокна подаються одночасно для запобігання укорочення одного з них в місці зварювання. операції оплавлення і зварювання, як правило, виконуються автоматично. В сучасних автоматичних зварювальних апаратах для зняття механічної напруги в точці з'єднання оптичних волокон передбачений режим прогрівання місця стику після закінчення процесу зварювання. Такий режим називається "режимом релаксації".

Цикл плавлення (тривалість подачі і сила струму як для попереднього оплавлення, так і для зварювання та релаксації) для оптичних волокон різних виробників і типів різні.

Деякі зварювальні апарати, крім розглянутих вище способів контролю якості місця зварювання, використовують ще й тест на розтягнення, щоб уникнути порушення з'єднання під час маніпуляцій при викладенні зростків в касету, а також в подальшому, в процесі експлуатації. З'єднане оптичне волокно міцно закріплено в напрямних платформах (які використовуються при юстуванні). Під контролем мікропроцесора по завершенні етапу зварювання ці напрямні платформи розходяться в протилежні сторони, утворюючи строго нормоване поздовжнє зусилля на розтяг, прикладене до місця стику. Вважається, що стик, що пройшов таке тестування, надійніший і виконаний більш якісно. при неможливості отримання стику, здатного пройти цей тест, але задовольняє за параметрами передачі, цю опцію можна відключити.

Схема етапів зварювання оптичних волокон з мінімізацією втрат і компенсацією зсуву [4].

Особливо слід відзначити зварювання стрічкових елементів (стрічкових волоконно-оптичних кабелів, що відрізняються великою кількістю оптичних волокон). Цю операцію можна проводити, тільки застосовуючи повністю автоматичний зварювальний апарат, за допомогою якого можна з'єднати до 12 оптичних волокон приблизно за 3 хвилини, причому середній рівень втрат складе близько 0,1-0,15 дБ [4]. Однак для зварювання стрічкових елементів необхідний досвідчений, добре підготовлений персонал.

Під час зварювання оптичні волокна розміщуються з відповідним зміщенням від осі електродів, що забезпечує рівномірне нагрівання. До початку процесу зварювання і по його завершенні перевіряється зсув оптичних волокон, стан торцевих поверхонь, а також деформація.

При зварюванні стрічкових елементів необхідно, крім основних процесів, розглянутих раніше, провести ще три технологічні операції: усунути розбіжності торців з'єднаних оптичних волокон, плавлення всіх волокон виконати одночасно з однаковою температурою, в процесі попередньої оцінки виміряти рівень внесених втрат рефлектометром. Якщо виявилось, що результати не відповідають вимогам, процес зварювання повторюють.

Як показує практика, попередня оцінка якості зварних з'єднань оптичних волокон, що базується на методі Pas, може містити похибку в діапазоні 5-1000%, тому остаточний висновок про якість зварного з'єднання варто робити після вимірів рефлектометром.

У міру вдосконалення якості зварювального устаткування і технології зварювання зростають можливості отримання зварних з'єднань оптичних волокон високої якості. Втрати на зварних з'єднаннях залежать від декількох факторів: досвіду персоналу, геометричних похибок зварювальних оптичних волокон, а також від матеріалів, з яких виготовлені волокна. Особливо часто проблеми виникають при зварюванні оптичних волокон різних виробників. Справа в тому, що оптичні волокна різних виробників виготовляються з використанням принципово різних технологічних процесів. В результаті матеріал оптичних волокон - кварцове скло - не є ідентичним в волокнах різного походження, незважаючи на те, що параметри оптичних волокон, зазначені в специфікаціях виробників, відрізняються незначно.

Факторами, що визначають властивості скла, є технологія виготовлення і якість матеріалів. Численні дослідження показали, що тисячні частки відсотка домішок в кварцовому склі надають більший вплив, ніж добавки в десятки відсотків тих же компонентів до багатоконпонентного скла.

Для зварювання найбільший вплив мають такі характеристики: щільність, коефіцієнт теплового розширення, показник заломлення, в'язкість і механічні

характеристики. Ці параметри визначають оптичні втрати в місцях зрощування і повинні прийматися до уваги при використанні оптичних волокон, вироблених за різними технологіями, в межах елементарної кабельної ділянки ВОЛЗ. Особливу увагу слід приділяти ідентифікації оптичних волокон в кабелі по типу, виробнику і технології виготовлення.

На рис.2.2.2, 2.2.3 і 2.2.4 наведені приклади технічних засобів, що використовуються для зварювання. Сколювач оптичних волокон DVP-107H (рис.2.2.2) має шкалу для вимірювання зачищеного оптоволоконна и наступні параметри [3]:

- Середній кут відколу $0,5^\circ$
- Блокування вільного ходу ріжучого елемента
- Можливість юстування при обслуговуванні
- Ресурс ріжучого елемента 48 000 відколів



Рис.2.2.2 Сколювач оптичних волокон DVP-107H

Стрипер ЛС-375 призначений для зняття зовнішніх оболонок ОВ (рис.2.2.3), підходить практично до будь-якого типу кабелю, зачищає буферний шар, ізоляцію і лак, діаметр кабелю: 125, 250, 900 мкм, 2 - 3 мм [3]. Ручка стрипера виготовлена з термопластичного каучуку.



Рис. 2.2.3 Стрипер JIS-375

Зварювальний апарат фірми FUJIKURA FSM-17S зображений на рис.2.2.4.



Рис.2.2.4 Зварювальний апарат фірми FUJIKURA FSM-17S

Механічні з'єднувачі

Волоконно-оптичне зварювання (сплайсинг) є важливим методом з'єднання двох оптоволоконних кабелів. Це основне рішення, коли наявний оптоволоконний

кабель недостатньо довгий для необхідної відстані. Сплайсинг також призначений для відновлення волоконно-оптичних кабелів, що мають механічні пошкодження. В даний час волоконно-оптичний сплайсинг широко використовується в телекомунікаціях, локальних мережах і мережевих проектах. Як правило, волоконно-оптичні з'єднання можуть виконуватися двома способами: зварювальне з'єднання і механічне з'єднання. [3]

При з'єднанні однотипних волокон, що має найбільше поширення на практиці, ефективним є з'єднання торець до торця (core to core), яке може бути реалізовано тільки при забезпеченні суворості волокон, ідентичності геометрії, а також високого ступеня гладкості та перпендикулярності торцевих поверхонь до осі волокон.

Втрати, що вносяться механічним з'єднувачем, визначаються дефектами з'єднання, викликаними радіальним, кутовим та осьовим зсувом волокон, що з'єднуються. Так як осьове зміщення позначається на з'єднанні меншою мірою, при створенні механічних з'єднувачів основна увага приділяється мінімізації радіального і кутового зміщення. Це досягається, з одного боку, використанням високоякісних сколювачів, що забезпечують перпендикулярність скола волокна з точністю до 1 градуса, а з іншого – шарнірних centruючих елементів (Fibrlok фірми 3М) або напрямних, що мають V-подібну форму (Corelink фірми 3М). Крім того, в механічних з'єднувачах використовується імерсійний гель як середовище, що узгоджує. Такі конструкції забезпечують типове значення втрат, що дорівнює 0,2-0,5 дБ для багатомодових волокон і 0,2-1 дБ для одномодових волокон при відображенні, що не перевищує -45 дБ (Fibrlok) і -55 дБ (Corelink) (рис.2.2.5). Кількість циклів з'єднання становить понад 10, а час з'єднання після підготовки волокон не перевищує 30 с. Діапазон робочих температур даних з'єднувачів лежить у межах -40С до +80С.



Рис.2.2.5 Зовнішній вигляд механічного з'єднувача Corelink

Оптичні роз'ємні з'єднувачі

Оптичні роз'ємні з'єднувачі призначені для зрощування ОВ. А саме, призначення оптичного з'єднувача — точне юстування і фіксація серцевини оптичних волокон, що з'єднуються, для передачі оптичного сигналу з одного волокна в інше з мінімальними втратами.

З'єднання має бути захищене від впливу пилу, вологи, бути стійким до впливу поздовжніх зусиль, що розтягують, і змін температури.

Роз'ємні з'єднувачі (РЗ) або роз'єми допускають багаторазове з'єднання та роз'єднання без погіршення параметрів і застосовуються в оптичних кросах та для підключення обладнання до кабелю.

Оптичні з'єднувачі виготовляються як у багатомодовому (БМ), так і одномодовому (ОМ) варіанті. ОМ варіант відрізняється переважно більш жорсткими допусками на геометричні розміри накінецьника і центруючих елементів розетки, що дозволяють утримати в прийнятних межах втрати при зрощуванні ОМ волокон. Параметри основних типів роз'ємних з'єднувачів надані у таблиці 2.2.1.

Таблиця 2.2.1.Параметри основних типів роз'ємних з'єднувачів

Тип конектора	Матеріал наконечника	Середні втрати, дБ на $\lambda=1,3$ мкм	
		ММ (62,5/125)	ОМ
ST	Кераміка	0,25	0,3
SC	Кераміка	0,2	0,25
FC	Кераміка	0,2	0,6

Біконічний	Пластмаса	0,7	-
SMA	Сталь	1,0	-
МІС	Кераміка	0,3	0,4

Виконуючи функцію з'єднання оптичних волокон у тракці, роз'єми на відміну від зварних з'єднань, будучи роз'ємними, забезпечують підключення до волоконно-оптичного тракту кінцевих елементів, джерел та приймачів оптичного випромінювання, перекомутацію та зміну топології кабельної системи.

Основою більшості конструкцій РС є штекерний наконечник, який вставляється в юстируючий елемент у вигляді втулки, а сам з'єднувач складається з двох частин: вилки (конектора-connector) та розетки (адаптера - adaptor) (рис.2.2.6).

Адаптер (adaptor) - виконує роль узгоджувального пристрою - це механічний елемент, що забезпечує суміщення, центрування, з'єднання та механічну фіксацію осей оптичних волокон у роз'ємних оптичних з'єднаннях, виконує підключення один до одного вилок (конекторів) несумісних розмірів або типів.

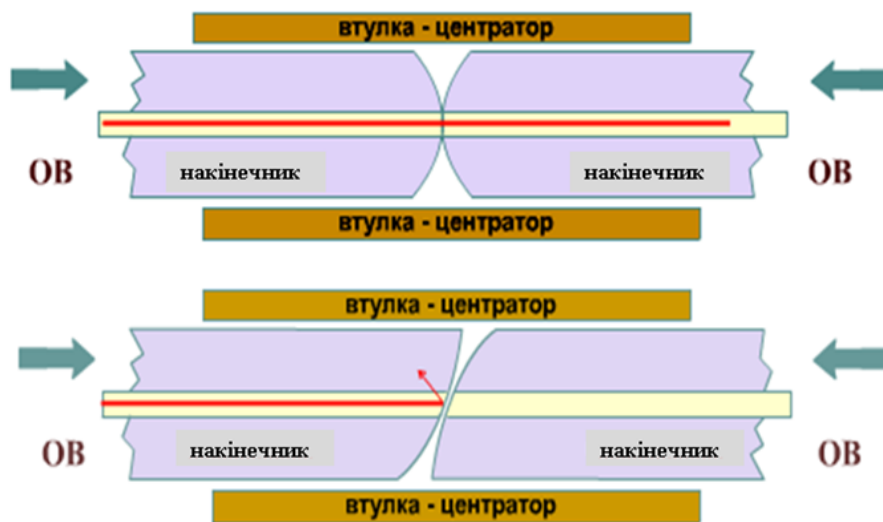


Рис.2.2.6 Конструкція оптичних з'єднувачів

Більшість роз'ємних з'єднань містять такі елементи:

- наконечник (ferrule) – використовується для фіксації волокон у роз'ємі,
- сполучна гільза – служить для суміщення наконечників, є частиною адаптера,

- антиобертальний механізм – запобігає обертанню наконечників, не допускаючи руйнування волокна,
- пружинний механізм – забезпечує необхідне зусилля стиснення наконечників,
- система гасіння натягу – передає зусилля натягу кабелю на несучу конструкцію роз'єму,
- адаптер.

До основних параметрів оптичних з'єднувачів відносяться:

- втрати, що вносяться (insertion loss):

$$IL = -10 \lg D = -10 \lg (P_{out}/P_{in}), \text{ дБ},$$

де P_{out} і P_{in} – потужності на виході та вході з'єднання, $D = P_{out}/P_{in}$ - коефіцієнт передачі оптичної потужності при торцевому з'єднанні,

- втрати на зворотному відбитті або просто зворотні втрати:

$$b = 10 \lg R = 10 \lg (P_{від}/P_{пад}), \text{ дБ},$$

де $P_{від}$ - інтенсивність відбитого випромінювання, $P_{пад}$ – інтенсивність падаючого випромінювання, $R = P_{від} / P_{пад}$ - коефіцієнт зворотного відбиття.

Кращим є з'єднання з нижчими втратами (ближче до 0 дБ) і нижчими (від'ємнішими) зворотними втратами. Величина загасання, що вноситься, в першу чергу залежить від поперечного роз'юстування волокон, що стикуються.

Величина зворотних втрат визначається типом полірування. Для PC-роз'ємів (наприклад FC/PC: FC - тип конектора (вилки); PC - фізичний контакт) цей параметр може сильно змінитися через знос, навіть незначний, в області торця волокна.

PC (physical contact) означає, що ОВ одного конектора з певним зусиллям притиснуто до ОВ іншого.

Зворотне відбиття може бути зменшено під час використання кутового (похилого) (APC) фізичного контакту (конектори зі скошеними наконечниками). При похилому торці навіть у тому випадку, коли немає фізичного контакту, сильний відбитий сигнал не поширюється у серцевину ОВ, а потрапляє в оболонку (рис.2.2.6).

Для кута 8° зворотне відбиття -70дБ.

Найсерйозніші проблеми відображений сигнал викликає у роботі джерел сигналу ВОСП. Це найбільш суттєво для мереж кабельного телебачення, а також у DWDM-системах, де використовуються вузькосмугові лазери, чутливі до відбитого сигналу.



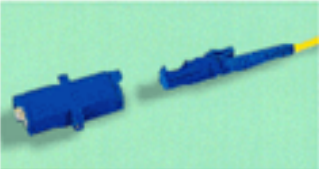
Рекомендоване значення зворотного відбиття не гірше від -35 дБ.

Залежно від коефіцієнта зворотного відбиття одномодові з'єднувачі поділяються на класи:

- для PC $b < -30$ дБ;
- для Super PC (SPC) $b < -40$ дБ;
- для Ultra PC (UPC) $b < -50$ дБ;
- для Angled PC (APC) $b < -60$ дБ.

Абревіатури PC, SPC, UPC, APC записуються через дріб після назви конектора. Наприклад: FC/ PC. Типові значення параметрів конекторів різних типів наведені у таблиці 2.2.2.

Таблиця 2.2.2 Значення параметрів конекторів

Тип конектора	Технічні характеристики					
 <p data-bbox="501 524 571 546">FC PC</p>		Multimode	Single mode	Single mode APC	Од.	Тест
	Загасання, що вноситься (IL)	тип. 0.2 макс.0.5	тип. 0.2 макс.0.35	тип. 0.2 макс.0.35	dB	IEC1300-3-4; на 1300/1550нм
	Зворотне розсіювання (RL)	тип. -40	-50	-70	dB	IEC1300-3-4; на 1300/1550нм
	Розкид загасання IL	макс.+/- 0.1	макс.+/- 0.1	макс.+/- 0.1	dB	за термін служби
	Термін служби	min. 1000 з'єднань/роз'єднань				
 <p data-bbox="501 1084 571 1106">SC PC</p>		Multimode	Single mode	Single mode APC	Од.	Тест
	Загасання, що вноситься (IL)	тип. 0.2 макс.0.5	тип. 0.15 макс.0.35	тип. 0.15 макс.0.35	dB	IEC1300-3-4; на 1300/1550нм
	Зворотне розсіювання (RL)	тип. -40	-50	-70	dB	IEC1300-3-4; на 1300/1550нм
	Розкид загасання IL	макс.+/- 0.1	макс.+/- 0.1	макс.+/- 0.1	dB	за термін служби
	Термін служби	min. 1000 з'єднань/роз'єднань				
 <p data-bbox="331 1594 446 1617">E2000 PC</p>		Multimode	Single mode	Single mode APC	Од.	Тест
	Загасання, що вноситься (IL)	тип. 0.2 макс.0.4	тип. 0.12 макс.0.35	тип. 0.12 макс.0.35	dB	IEC1300-3-4; на 1300/1550нм
	Зворотне розсіювання (RL)	тип. -40	-50	-70	dB	IEC1300-3-4; на 1300/1550нм
	Розкид загасання IL	макс.+/- 0.1	макс.+/- 0.1	макс.+/- 0.1	dB	за термін служби
	Термін служби	min. 1000 з'єднань/роз'єднань				

2.3 Оптичні ізолятори

Оптичні ізолятори – це пасивні оптичні елементи, що використовуються в одномодових волоконно-оптичних системах передачі для ефективного зменшення впливу зворотних відбиттів.

Оптичний сигнал, поширюючись волокном, відбивається від різних неоднорідностей (наприклад, оптичних з'єднувачів). Відбитий сигнал, потрапляючи в резонатор лазера, здатний посилюватися індуковано, призводячи до паразитного сигналу. Найбільш кардинальний спосіб придушення відбитого сигналу ґрунтується на використанні оптичних ізоляторів.

Оптичний ізолятор забезпечує пропускання оптичного сигналу в одному напрямку майже без втрат, а в іншому напрямку (назад) з великим загасанням.

Переваги оптичних ізоляторів:

- Нечутливість до поляризації випромінювання;
- Високий ступінь ізоляції;
- Малі втрати, що вносяться;
- Високий рівень зворотних втрат.

Застосування оптичних ізоляторів:

- Системи передачі з довгими (наддовгими) ділянками;
- Волоконно-оптичні підсилювачі;
- Системи кабельного телебачення.

Оптичний ізолятор, як правило, складається з трьох елементів (рис.2.3.1): 1 – поляризатора (вхідного поляризатора), 2 – ячейки Фарадея, 3 – аналізатора (вихідного поляризатора). Параметри ячейки Фарадея вибираються так, щоб вісь поляризації світла, що проходить через неї, розгорталася на 45° . Під таким же кутом встановлюються осі поляризаторів.

Вхідний корисний сигнал, проходячи через поляризатор, залишає свою вертикальну складову без зміни. Далі вертикально поляризоване світло проходить через комірку Фарадея, яка розгортає площину поляризації на 45° , після чого світло проходить через аналізатор.

При поширенні оптичного сигналу у зворотному напрямку він також поляризується в площині аналізатора 3, і потім, проходячи через комірку Фарадея

2, стає горизонтально поляризованим. Таким чином, осі поляризації оптичного сигналу і поляризатора 1 складають кут 90° , тому поляризатор 1 не пропускає зворотне випромінювання (відбитий сигнал).

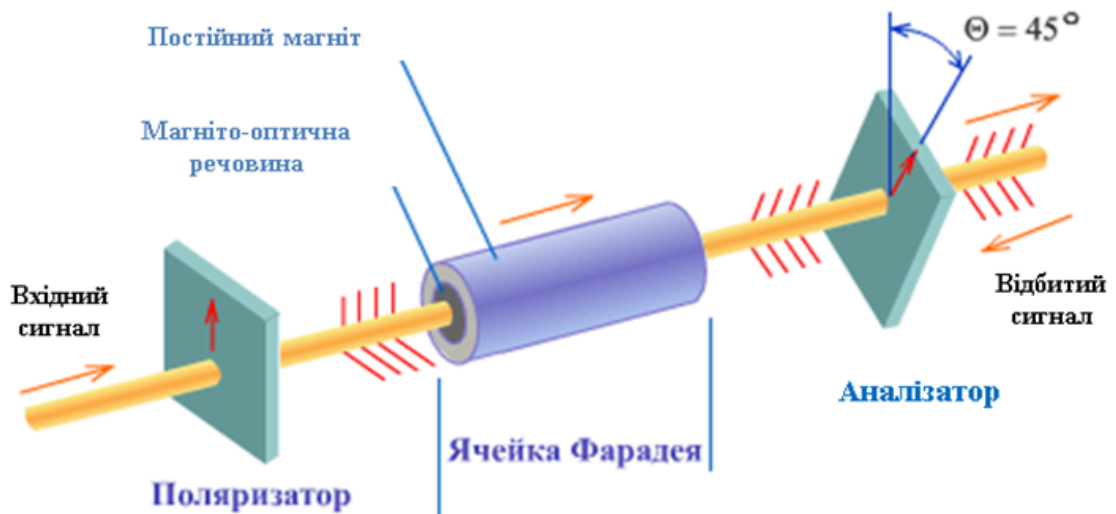


Рис. 2.3.1 Структура оптичного ізолятора

Приклад зовнішнього вигляду оптичного ізолятора та його характеристик відображені на рис.2.3.2 та в таблиці 2.3.1.

Таблиця 2.3.1 Параметри оптичного ізолятора

Технічні характеристики	
Довжина хвилі, нм	1550±10
Максимальна ізоляція, дБ	не менше 40
Втрати, що вносяться (типове значення), дБ	0,6
Втрати, що вносяться (максимальне значення), дБ	не більше 0,9
Зворотні відображення (вх/вих), дБ	не менше 55/50
Втрати, що залежать від поляризації, дБ	не більше 0,2
Ширина смуги (22°C) при ізоляції 25 дБ, нм	±15



Рис. 2.3.2 Оптичний ізолятор

2.4 Оптичні атенюатори

Атенюатор - пристрій, що застосовується для ослаблення сигналів у коротких лініях і тоді, коли потужність сигналу надто велика для нормальної роботи приймача. А також для імітації втрат оптичної лінії у процесі різних тестових перевірок та випробувань активного обладнання.

Ослаблення сигналу здійснюється шляхом внесення додаткового загасання оптичний сигнал.

Відомі реалізації цього пристрою у вигляді сполучного шнура, конектора або розетки (рис.2.4.1, 2.4.2 і 2.4.3).



Рис.2.4.1 Оптичний атенюатор у вигляді сполучного шнура



Рис.2.4.2 Оптичний атенюатор у вигляді конектора

Атенюатори-шнури закінчуються з обох сторін з'єднувачами (ST, SC, FC, LC). Згасання в шнурі забезпечується завдяки спеціальному волокну.

Атенюатори-розетки і атенюатори-конектори бувають як змінні (з плавно змінюваним загасанням за рахунок зміни величини повітряного зазору), так і фіксовані (з нерегульованим повітряним зазором або фільтром - наприклад, відрізком спеціального оптичного волокна).



Рис.2.4.3 Оптичний атенюатор у вигляді розетки

Атенюатори-розетки встановлюються між стандартною перехідною розеткою та оптичним з'єднувачем, зазвичай випускаються з фіксованим набором значень 5, 10, 15 та 20 дБ

Основними параметрами атенюаторів є:

- внесення загасання,
- глибина регулювання,
- рівень зворотного відбиття.

Зазвичай для БМ (багатомодове волокно) - діапазон зміни загасання, що вноситься 15 дБ, для ОМ (одномодове волокно) - 20 дБ.

Основні якісні показники атенюаторів - висока стабільність встановленого ослаблення, низький рівень зворотного відбиття (до -65 дБ та нижче), широкий діапазон робочих температур, компактність та висока механічна міцність.

Крім фіксованих атенюаторів-розеток, змінних атенюаторів-розеток, випускаються зварні атенюатори та прецизійні атенюатори.

Оптичні вимірювальні атенюатори (зазвичай прецизійні) призначені для регулювання та вимірювання загасання оптичного сигналу в одномодових волоконно-оптичних системах передачі.

Приклад вигляду вимірювальні атенюатори та його технічних характеристик зазначені на рис.2.4.4 та у таблиці 2.4.1.

Подібні атенюатори використовуються для регулювання потужності каналів системи DWDM.

Наприклад: вибіркове зменшення потужності на вході оптичного підсилювача EDFA для вирівнювання спектру (рис.2.4.5).

Таблиця 2.4.1

<i>Технічні характеристики</i>	
Робоча довжина хвилі, мкм	1,31 и 1,55
Початкове згасання (умовний "0"), дБ	менше 5
Діапазон, дБ	от <5 до 60
Ціна поділки барабана, дБ	0,1±0,05



Рис.2.4.4 Приклад вимірювального атенюатора



Рис.2.4.5 Вибіркове зменшення потужності на вході оптичного підсилювача EDFA для вирівнювання спектру

2.5 Оптичні комутатори

Комутатори використовуються для того, щоб при виникненні несправностей у мережі направити сигнал іншим оптичним шляхом або через іншу мережу (рис.2.5.1).

Оптичний сигнал перетворюється на електричний, крос-комутується, а потім відбувається зворотне перетворення електричного сигналу на оптичний.

Для сучасних повністю оптичних мереж важливо здійснювати повну заблоковану комутацію оптичних сигналів. Тому величезну практичну важливість набули пристрої оптичної крос-комутації ОХС (Optical Cross Connect), у яких немає оптоелектронного перетворення («прозора» комутація).

Такі пристрої реалізують на базі використання мікротехнології та технології на основі MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), яка дозволяє розмістити безліч лінз, що комутують, і мікродзеркал з їх приводами на одному кремнієвому кристалі. Такі пристрої можуть мати сотні портів, мають низькі втрати, високу ізоляцію каналів (до 80 дБ) і можуть використовуватися в широкому діапазоні довжин хвиль.

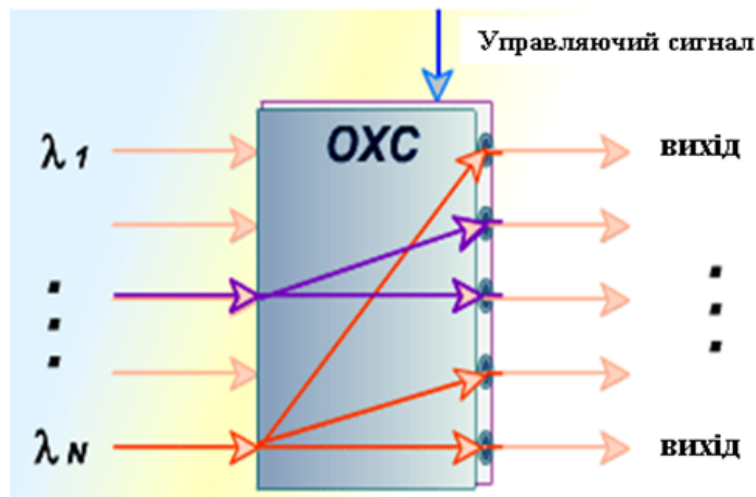


Рис.2.5.1 Узагальнена схема пристрою оптичної крос-комутації ОХС

Основними елементами оптичних маршрутизаторів є повністю оптичні крос-комутатори.

Головною їх перевагою є відсутність проміжного перетворення оптичного сигналу в електричний сигнал. Завдяки цьому може бути збільшена швидкість комутації і, головне, забезпечена прозорість роботи крос-комутатора: відсутність залежності від довжини хвилі, формату даних і протоколу передачі даних.

На основі розробок мікроелектромеханічних (MEMS) елементів створено повністю оптичний маршрутизатор Lucent Lambda Router. Принцип його роботи дуже простий: світловий промінь («зайчик») від елемента двомірної матриці вхідних волокон спрямовується на потрібний елемент двомірної матриці вихідних волокон за допомогою рухомих мікродзеркал, що змінюють нахил у двох площинах.

Шляхом об'єднання двох плоских хвилеводних дифракційних решіток з лінійкою мікродзеркал були створені λ -селективні комутатори 1x2 (рис.2.5.2).

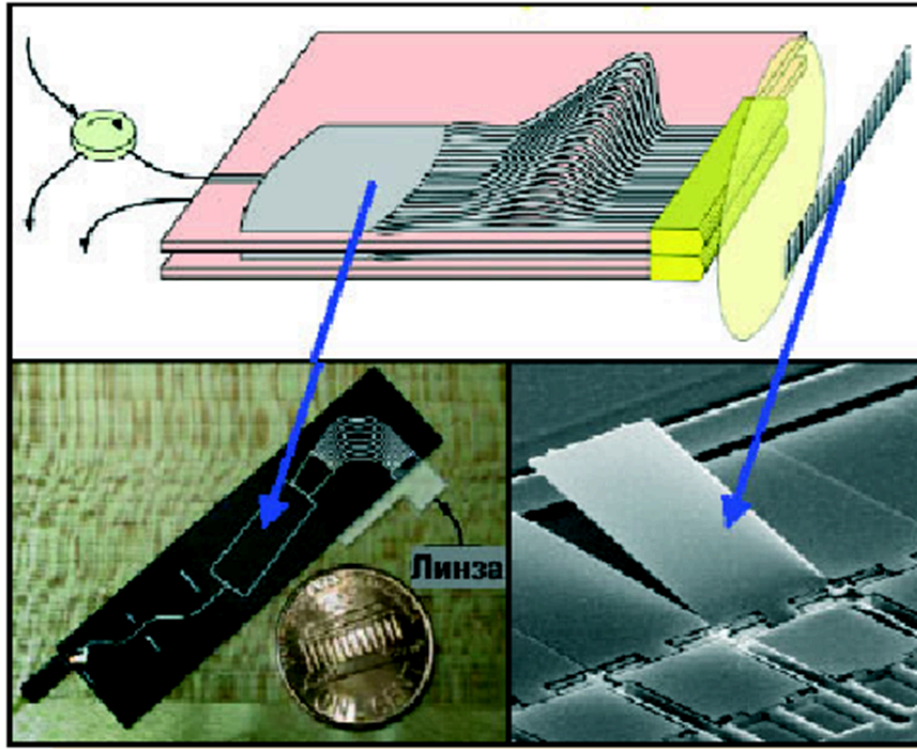


Рис. 2.5.2 Схема 1-селективного комутатора, що керується, 1x2 (зверху), фото плоскої хвильової дифракційної решітки (знизу зліва) та лінійки мікродзеркал (знизу справа)

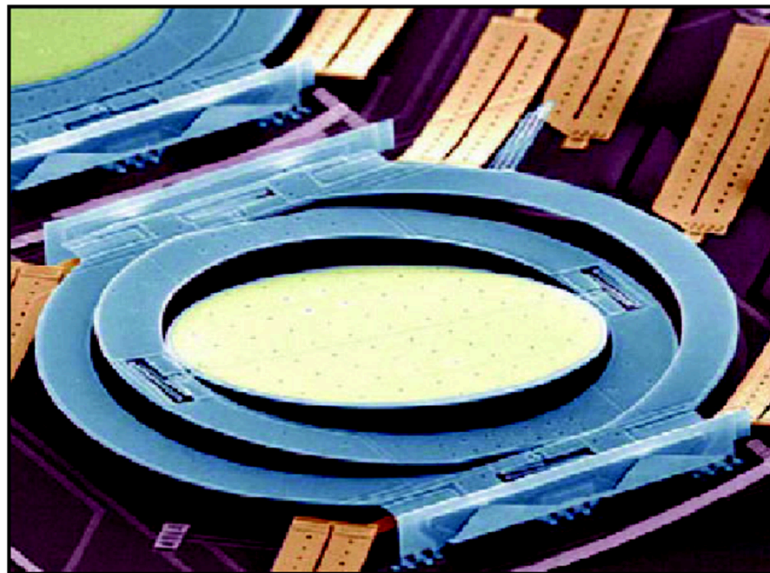


Рис.2.5.3 Фото мікродзеркала, що управляється і змінює кут нахилу у двох площинах. Діаметр дзеркала – 850 мкм

2.6 Пристрої компенсації хроматичної дисперсії

Зазвичай використовуються два типи пристроїв компенсації дисперсії:

- волокна, що компенсують дисперсію DCF (Dispersion Compensating Fibers);
- решітки, що компенсують дисперсію DCG (Dispersion Compensating Gratings).

Хроматична дисперсія призводить до розширення оптичних імпульсів у міру їхнього розповсюдження по оптичному волокну.

За великої протяжності лінії зв'язку це виявляється в тому, що імпульси, що йдуть близько, починають перекриватися, спотворюючи сигнал.

Пристрої компенсації дисперсії надають рівну за величиною сигнал, але протилежну за знаком дисперсію і відновлюють початкову форму імпульсів (рис.2.6.1).

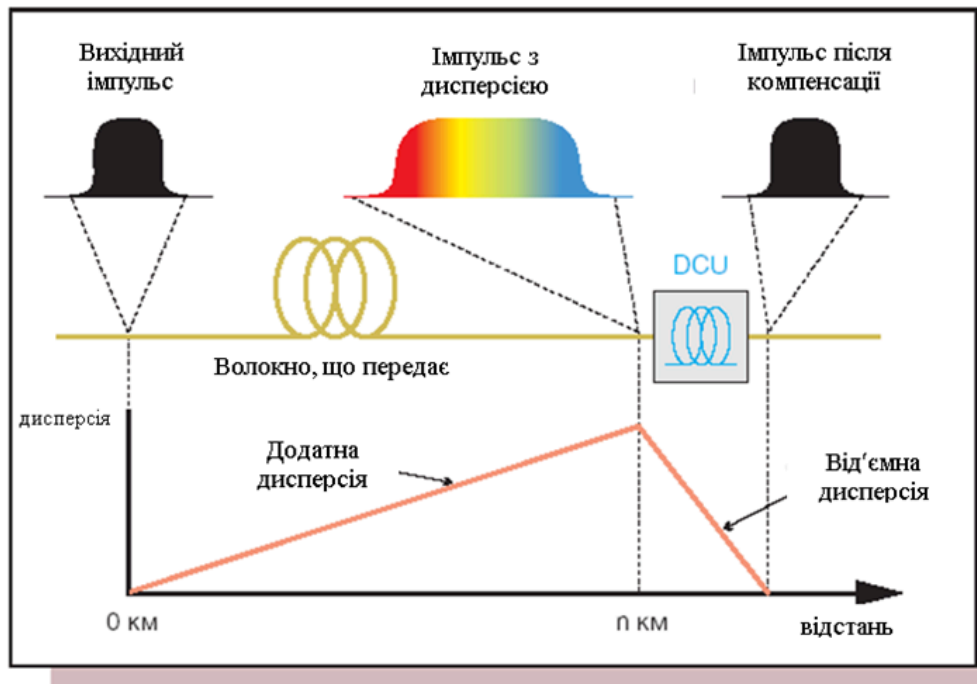


Рис. 2.6.1 Принцип компенсації хроматичної дисперсії

2.7 Оптичні мультиплексори/ демультиплексори

Оптичне мультиплексування та демультиплексування засноване на комбінованих або розташованих послідовно один за одним вузькосмугових фільтрах.

Застосовують тонкоплівкові фільтри, волоконні або об'ємні бреггівські дифракційні решітки, зварні біконічні волоконні розгалужувачі, фільтри на основі

рідких кристалів, пристрої інтегральної оптики (матриці фазових хвильоводних дифракційних решіток або фазари).

Оптичний мультиплексор об'єднує оптичні сигнали різних довжин хвиль, що подаються на його входні порти, в багатохвильовий оптичний сигнал на вихідному порту. Також вихідний сигнал називають багатоканальним, агрегатним. Відповідно оптичний демультиплексор виконує зворотну операцію, тобто розділяє багатоканальний оптичний сигнал, що подається на входний порт, на окремі оптичні сигнали різних довжин хвиль (оптичні канали), які виводяться через вихідні порти. Об'єднання та роз'єднання оптичних каналів виконується згідно частотного плану.

Принцип роботи DWDM-мультиплексора з поодиноким відбивачем можна пояснити на прикладі виконання операції демультиплексування (рис.2.7.1):

1. Мультиплексований сигнал подається на входний порт

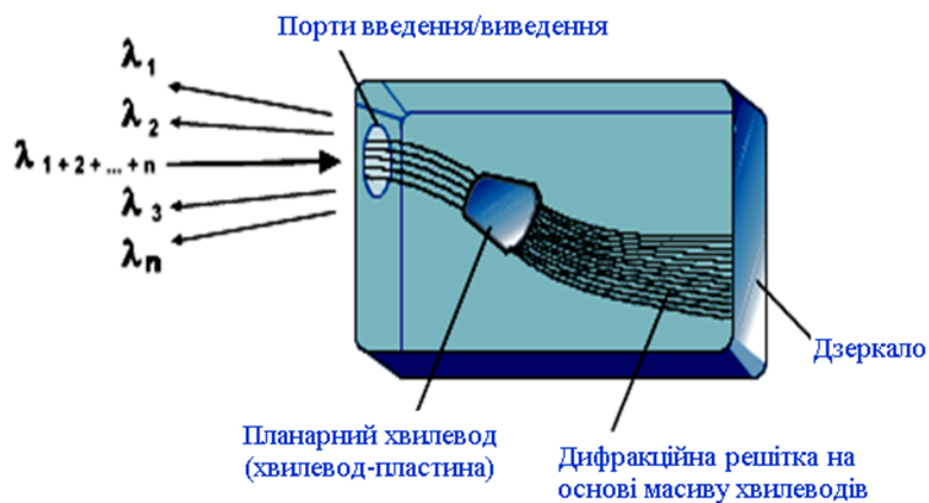


Рис. 2.7.1 Принцип роботи DWDM-мультиплексора з поодиноким відбивачем

2. Сигнал проходить через пластинчастий хвильовід, призначений для розподілу сигналу по безлічі хвильоводів, що відіграють роль гребінчастої дифракційної решітки (AWG, Arrayed waveguide grating), при цьому в кожному хвильоводі залишається багатоканальним, і, відповідно, у всіх хвильоводах представлений кожен канал.

3. Сигнали з виходів AWG відображаються дзеркальною поверхнею на пластинчастий хвилевід, де вони фокусуються та інтерферують, утворюючи просторово рознесені максимуми інтенсивності, що відповідають різним каналам.

Геометрія пластинчастого хвилеводу та довжини хвилеводів дифракційної решітки AWG розраховуються так, щоб інтерференційні максимуми розташовувалися на вихідних полюсах пристрою.

DWDM-мультиплексори відносяться до класу оптичних функціональних обчислювачів та є чисто пасивними пристроями. Вони характеризуються суттєвим загасанням оброблюваного сигналу (великими втратами, що вносяться). Наприклад, для пристрою з одним дзеркальним відбивачем, що працює в режимі демультимплексування, втрати можуть становити 10-12 дБ. Тому необхідно використовувати широкосмугові оптичні підсилювачі для компенсації втрат. Також цілком очевидними є виключно високі вимоги до точності виконання окремих вузлів DWDM-мультиплексорів - велика кількість каналів, що обробляються, і мала відстань між ними вимагають прецизійності. А це означає найвищу вартість.

Крім високих втрат і спричиненої технологічною специфікою високої ціни, принцип дії визначає і ряд специфічних переваг DWDM-мультиплексорів – насамперед принципову одночасність обробки всіх каналів (що еквівалентно абсолютно немислимим для цифрових обчислювачів швидкостям обробки).

Оптичні мультиплексори введення/виведення каналів OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) застосовуються для додавання або виділення з багатоканального оптичного сигналу одного або декількох каналів, не перетворюючи при цьому сигнали всіх каналів в електричну форму і потім назад (рис.2.7.2).

При конструюванні OADM використовуються технології, що застосовуються для мультиплексорів та демультимплексорів.

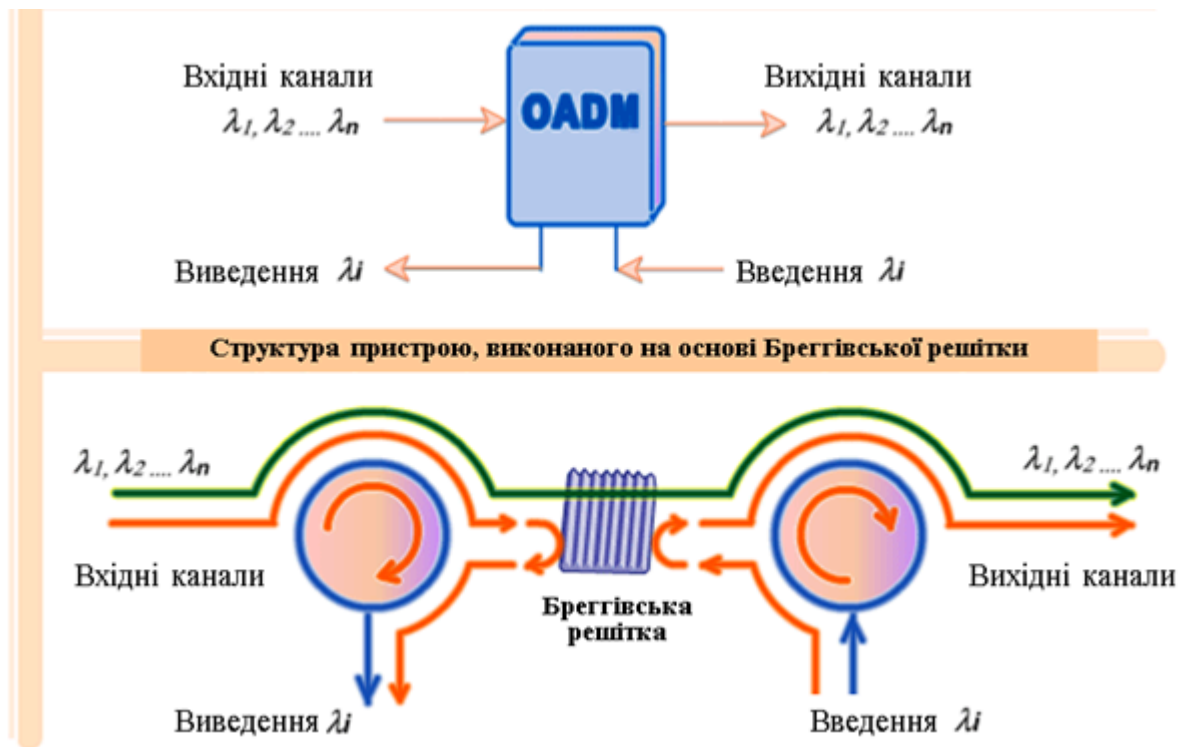


Рис.2.7.2 Схеми пристрою введення/виведення (мультиплексора OADM) спектрального каналу

Контрольні питання

1. Чим пасивні компоненти ВОЛТ відрізняються від активних?
2. В якому елементі роз'ємного з'єднання здійснюється саме з'єднання оптичних волокон?
3. Який пасивний компонент пропускає оптичний сигнал в одному напрямку і не пропускає в іншому?
4. Параметри оптичних конекторів із зазначенням середніх величин
5. Як розшифровується SC/APC і що означає (зміст, значення)?
6. Компенсатори хроматичної дисперсії. Призначення, принцип дії, параметри.
7. Оптичні мультиплексори та демультимплексори. Призначення, зазначити фізичні явища, на яких базується принцип дії, параметри.
8. Чому в системах DWDM обов'язково використовуються оптичні підсилювачі?
9. Коли застосовуються оптичні аттенюатори?

Вивчення конструкції оптичних конекторів, ODF та параметрів оптичних з'єднань

Мета роботи:

Розглянути конструкцію та призначення конструктивних елементів оптичних конекторів та механічних сплайсів, оптичного розділювального кросу ODF та параметрів оптичних роз'ємних з'єднань відомих виробників. Визначити їх вплив на загальне загасання у волоконно-оптичному лінійному тракті (ВОЛТ).

Порядок виконання роботи:

1. Користуючись Інтернет ресурсами відомих виробників ОК розглянути конструкцію та призначення конструктивних елементів оптичних конекторів та механічних сплайсів, оптичного розділювального кросу ODF та параметрів оптичних роз'ємних з'єднань. Результати вивчення представити у звіті.
2. За результатами роботи визначити, як параметри з'єднань впливають на загальне загасання у волоконно-оптичному лінійному тракті. Надати призначення розглянутих компонентів та типові параметри.

У звіті представити:

1. Загальний вигляд конструкції та призначення одного розподільного кросу та настінної шафи, зазначити параметри, що надаються виробником.
2. Загальний вигляд конструкції та призначення конструктивних елементів оптичних конекторів та механічних сплайсів. Зазначити параметри, що надаються виробником. Включити до розгляду конектор E2000.
3. Пояснення щодо впливу параметрів з'єднань на загальне загасання у волоконно-оптичному лінійному тракті. Призначення розглянутих компонентів та типові параметри.

Розділ 3 Активні компоненти ВОЛТ

До активних компонентів волоконно-оптичного лінійного тракту відносяться (ВОЛТ):

- Оптичні передавачі
- оптичні приймачі
- оптичні підсилювачі

3.1 Передавальний оптоелектронний модуль

Передавальний оптоелектронний модуль (ПОМ) або оптичний передавач забезпечує перетворення вхідного електричного (цифрового або аналогового) сигналу у вихідний оптичний сигнал.

Передавальні оптоелектронні модулі включають

- джерело випромінювання,
- електронні схеми для стабілізації режимів роботи джерела випромінювання (лазерного діода),
- оптичний з'єднувач або відрізок оптичного кабелю.

Виконані в єдиному конструктивному блоці.

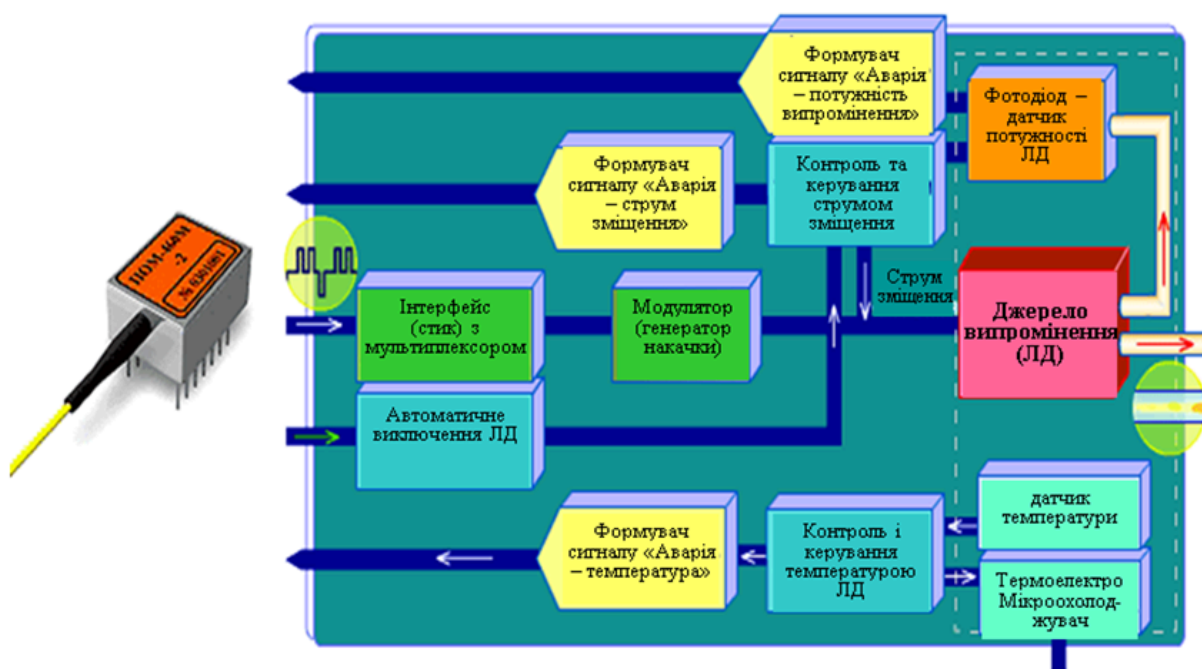


Рис. 3.1 Узагальнена структурна схема ПОМ

Головним елементом передавального оптоелектронного модуля (ПОМ) є джерело випромінювання, до якого пред'являються такі основні вимоги:

- випромінювання має вестися на довжині хвилі одного з вікон прозорості волокна, де досягаються менші втрати оптичного сигналу при розповсюдженні,
- джерело повинне витримувати необхідну частоту модуляції для забезпечення передачі інформації на потрібній швидкості,
- джерело може бути ефективним, тобто більша частина випромінювання джерела повинна потрапляти в ОВ з мінімальними втратами,
- повинен мати велику потужність, щоб сигнал можна було передавати на великі відстані, але не стільки, щоб випромінювання призводило до нелінійних ефектів або могло пошкодити ОВ або оптичний приймач,
- температурні варіації не повинні впливати на функціонування джерела випромінювання,
- вартість виробництва джерела випромінювання має бути відносно невисокою.

Використовуються два типи джерел випромінювання: **світлодіоди** та **лазерні діоди** (рис.3.1.1).

Головна їхня відмінність—в ширині спектра випромінювання. Ще одна важлива відмінність – у допустимій частоті модуляції оптичного сигналу. Також відрізняються потужності сигналу, що випромінюються. У лазерного діода оптична потужність зосереджена у вузько напрямленому промені і може досягати значних величин. Діаграму направленості світловипромінюючого діода можна представити у вигляді сфери, тобто світлодіод випромінює у різні сторони і потужність сигналу буде малою.

Принцип роботи напівпровідникових джерел заснований на явищі електролюмінесценції - випромінюванні світла матеріалом, через який протікає електричний струм, спричинений електричним полем.

Випромінювання внаслідок електролюмінесценції (на відміну від теплового) характеризується порівняно вузьким спектром шириною 10...50 нм для світлодіодів і 0,01...3 нм і менше для лазерних діодів.

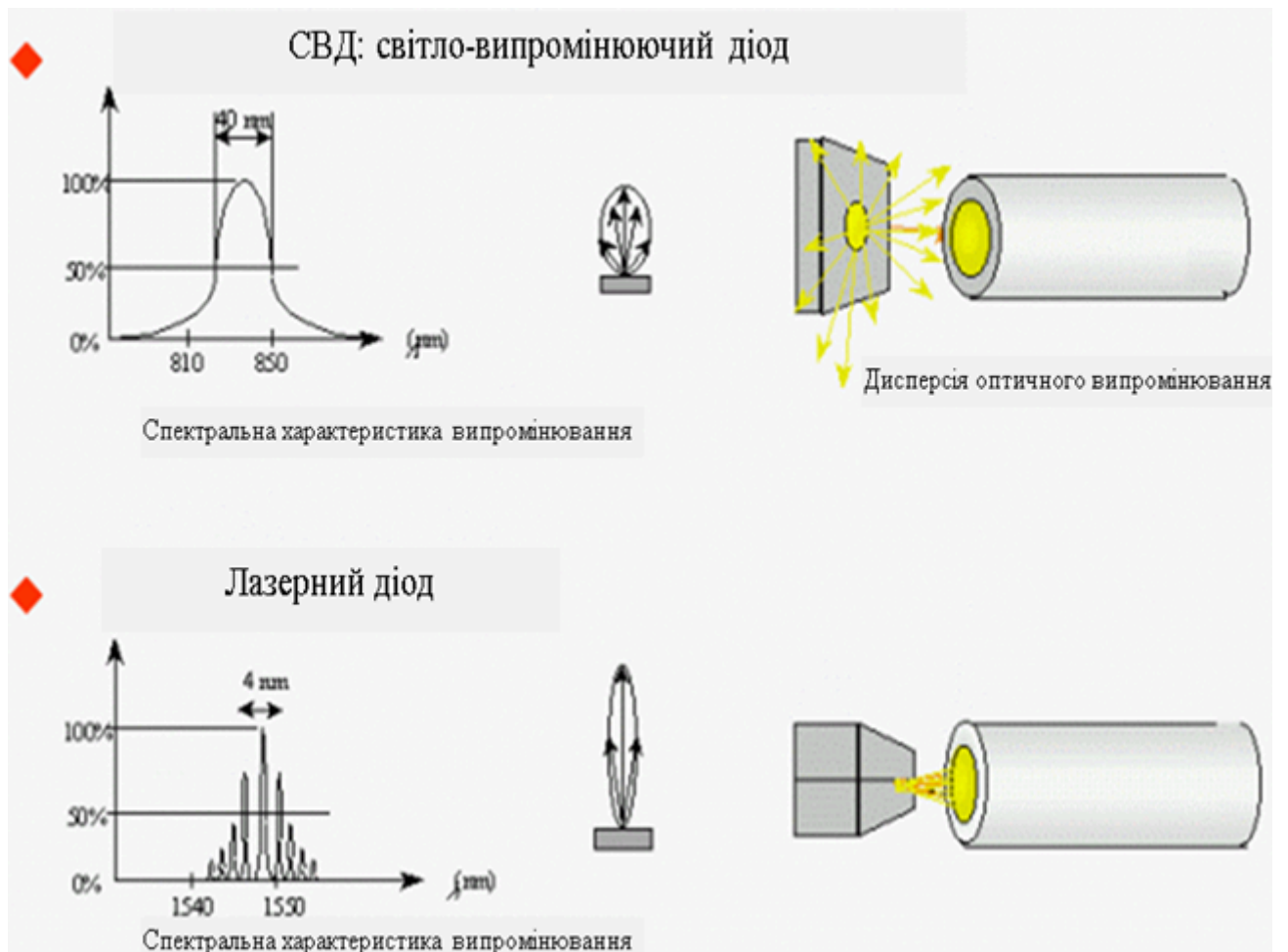


Рис.3.1.1 Різниця між лазерними та світловипромінюючими діодами

На рис.3.1.2 наведена ватт-амперна характеристика лазерного діоду. При струмах накачки менше за пороговий, лазерний діод поводить себе як світлодіод, тобто випромінює широкий спектр і має маленьку потужність. При досягненні порогового значення струму накачки починається режим лазерної генерації з вузькою діаграмою напрямленості і значною потужністю випромінювання.

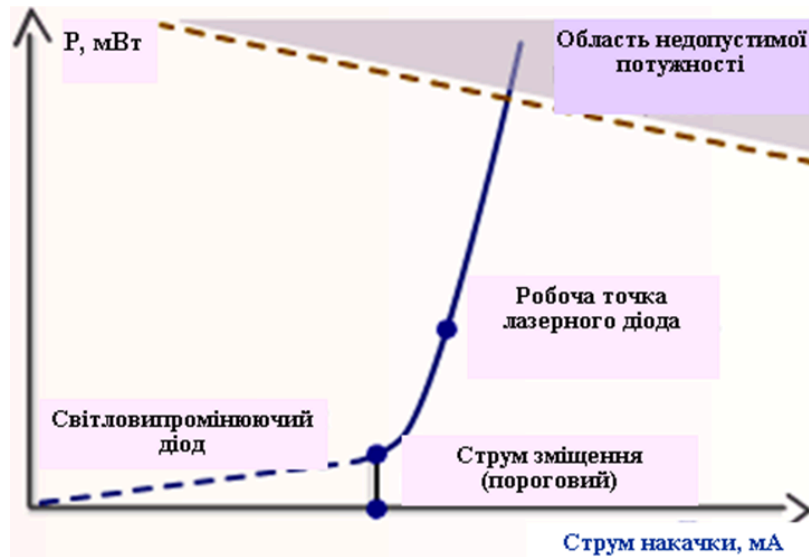


Рис.3.1.2 Ватт-амперна характеристика лазерного діода

Робоча точка лазерного діода обирається на крутій ділянці ватт-амперної характеристики з режимом лазерної генерації, тому для лазерного діода завжди контролюються рівень вихідної потужності, струм накачки і температура.

Найбільшого поширення як джерела випромінювання отримали лазерні діоди (ЛД):

- ЛД з резонатором Фабрі-Перо (FPR),
- ЛД з розподіленим зворотним зв'язком (DFB),
- ЛД з розподіленим бреггівським відбиттям (DBR),
- із зовнішнім резонатором.

Лазерний діод із резонатором Фабрі-Перо (FPR)

ЛД з резонатором Фабрі-Перо (FPR) є найпростішим за конструкцією (рис.3.1.3), тому має не найкращі характеристики за шириною спектра випромінювання та допустимою частотою модуляції оптичного сигналу. Параметри сильно залежать від температури.

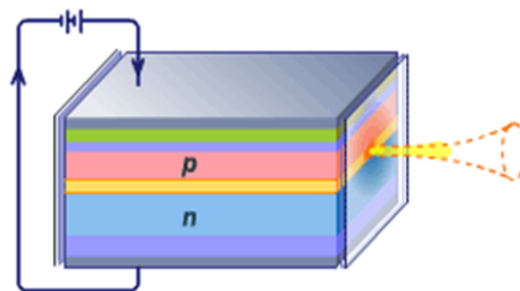


Рис.3.1.3 ЛД з резонатором Фабрі-Перо

Резонатор утворюється торцевими поверхнями, що оточують з обох боків гетероперехід (рис.3.1.4). Одна з поверхонь відбиває світло з коефіцієнтом відбиття близько 100%, інша є напівпрозорою, забезпечуючи вихід випромінювання назовні.

У діапазоні поруч із основним піком, у якому зосереджена основна потужність випромінювання, існують побічні максимуми (рис.3.1.5 а). Причина пов'язана з умовами утворення стоячих хвиль.



Рис.3.1.4 Резонатор Фабрі-Перо

Лазерний діод із розподіленим зворотним зв'язком (DFB лазер) і лазерний діод із розподіленим бреггівським відбиттям (DBR лазер)

Ці лазерні діоди є модифікацією плоского резонатора Фабрі-Перо, в який додано періодичну просторову модуляційну структуру. Вона в DFB лазерах поєднана з активною областю, а DBR винесена за межі активної області.

Періодична структура впливає на умови поширення та характеристики випромінювання.

Переваги цих лазерів у порівнянні з FPR:

- зменшення залежності довжини хвилі випромінювання лазера від струму інжекції та температури (температурний коефіцієнт для FPR порядку 0,5-1 нм/С, у той час як для DFB порядку 0,07-0,09 нм/С);
- висока стабільність одномодовості;
- практично 100% глибина модуляції.

Недоліки:

- Складна технологія виготовлення і, отже, вища ціна.

Спектральні характеристики випромінювання лазерних діодів наведені на рис.3.1.5. Лазерні діоди DFB і DBR випромінюють один вузький основний пік, в якому зосереджена майже вся потужність (рис.3.1.5 б), тому для таких одномодових ЛД нормуються такі спектральні характеристики, як ширина спектру випромінювання на рівні -20 дБ (рис.3.1.5 б) та коефіцієнт придушення бокової моди (рис.3.1.5 в), який повинен бути не гірше, ніж 30 дБ.

На відміну від одномодових ЛД лазерний діод на резонаторі Фабрі-Перо є багатомодовим і для нього нормується середньо-квадратична ширина спектру (рис.3.1.5 а) на рівні - 3дБ від максимуму огинаючої мод випромінювання.

Лазерний діод із зовнішнім резонатором

У лазерних діодах із зовнішнім резонатором (рис.3.1.6), змінюючи відстань до дзеркала і одночасно розвертаючи дзеркало-решітку (це еквівалентно зміні кроку решітки), можна плавно змінювати випромінювання, причому діапазон налаштування досягає 30 нм.

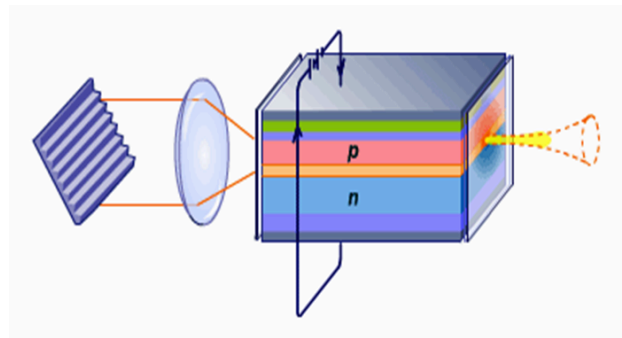
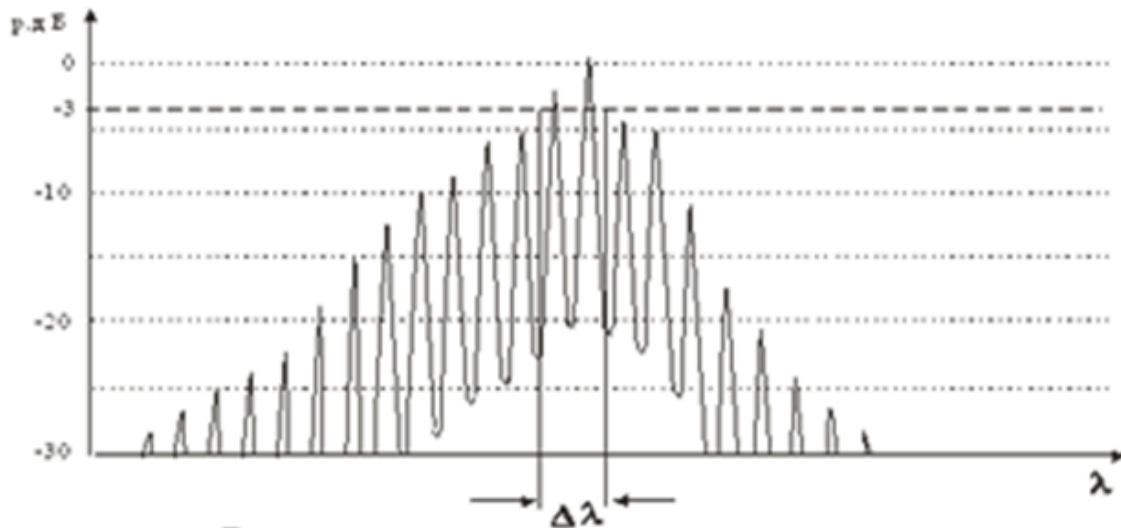


Рис.3.1.6 ЛД із зовнішнім резонатором

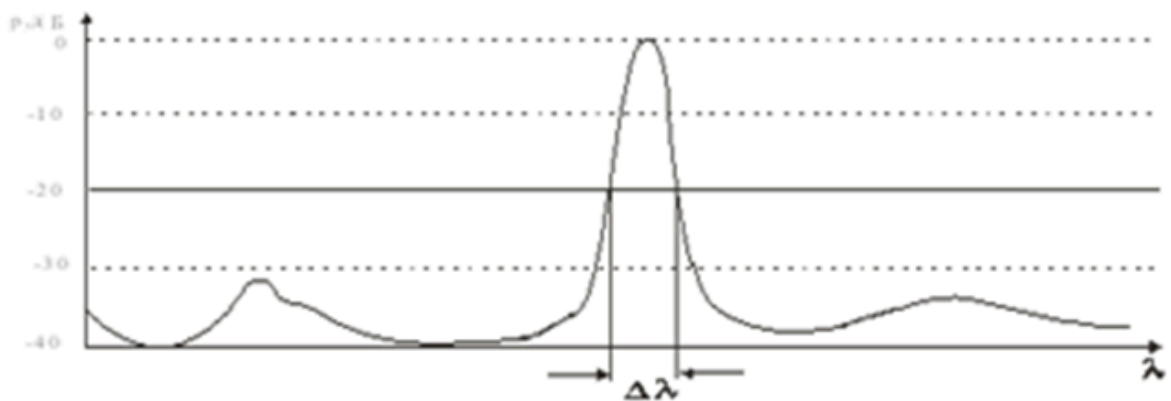
Тому лазери із зовнішнім резонатором незамінні при розробці апаратури з розділенням за довжиною хвилі та виміральної апаратури для ВОЛЗ.

За характеристиками схожі з DFB та DBR лазерами.



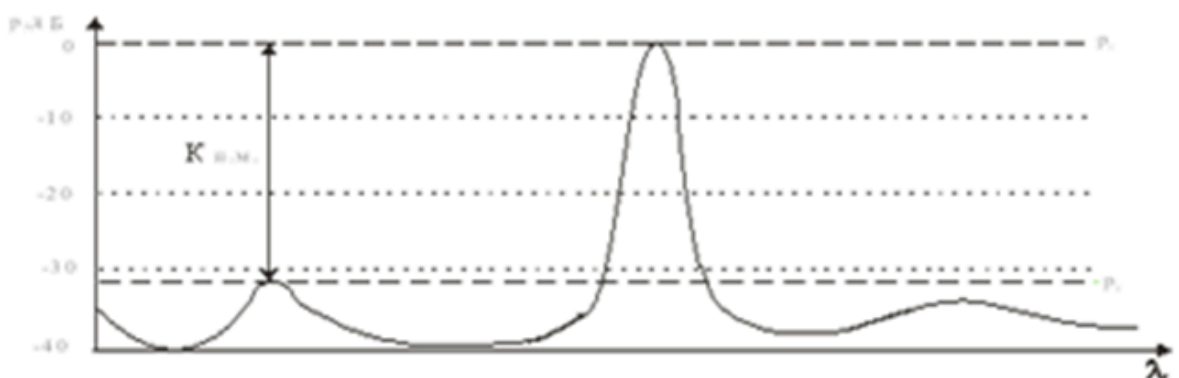
$p = 10 \lg \frac{P}{P_0}$ дБ - Рівень випромінюваної потужності лазерного діода
 $\Delta \lambda$ - Максимальна середньоквадратична ширина спектра

Рис.а Спектральна характеристика багатомодового лазерного діода



$\Delta \lambda$ - Максимальна ширина спектра

Рис.б Спектральна характеристика одномодового лазерного діода



$K_{п.м} = p_1 - p_2 \geq 30$ дБ - Коефіцієнт придушення бокової моди одномодового лазерного діода

Рис.в Спектральна характеристика випромінювання одномодового лазерного діода

Рис.3.1.5 Спектральні характеристики лазерних діодів

3.2 Приймальний оптоелектронний модуль

Приймальний оптоелектронний модуль (ПРОМ) або оптичний приймач забезпечує перетворення вхідного оптичного сигналу у вихідний електричний (цифровий або аналоговий) сигнал (рис.3.2.1).

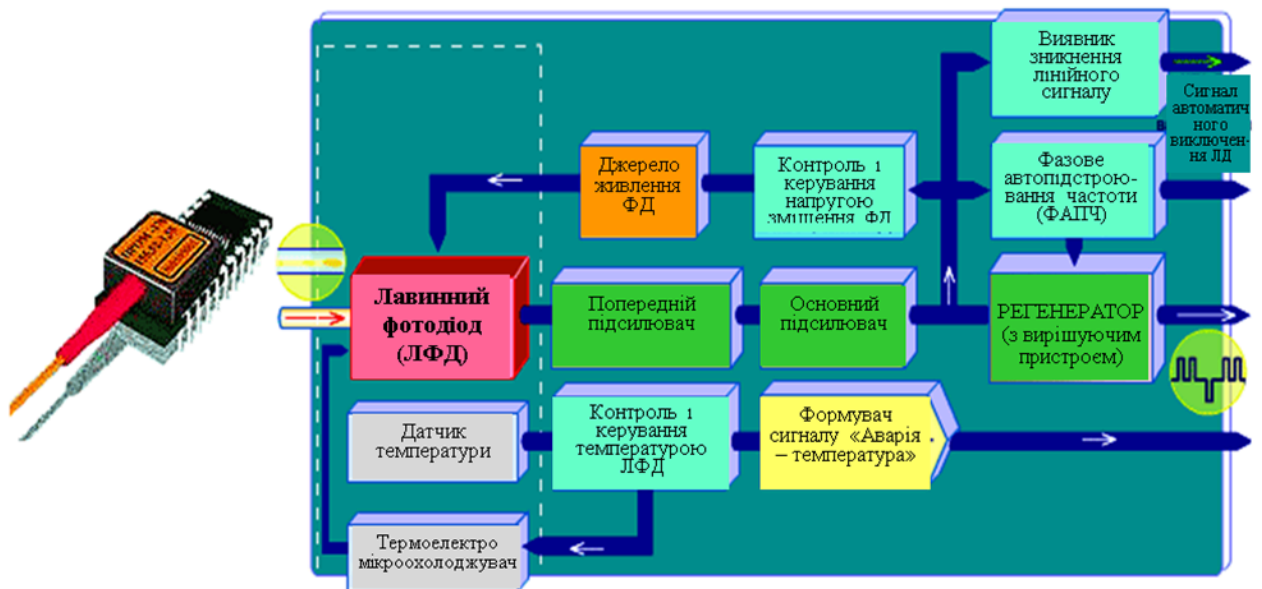


Рис.3.2.1 Узагальнена структурна схема ПРОМ

Основними функціональними елементами приймального оптоелектронного модуля (ПРОМ) є:

- фотоприймач, що перетворює отриманий оптичний сигнал в електричну форму,
- каскад електричних підсилювачів, що підсилюють сигнал і перетворюють його у форму, придатну до обробки,
- демодулятор, що відтворює початкову форму сигналу.

Головним елементом приймального оптоелектронного модуля є - **фотоприймальний діод**.

В основі роботи фотоприймача лежить **явище внутрішнього фотоефекту**, при якому в результаті поглинання фотонів з енергією, що перевищує енергію забороненої зони, відбувається перехід електронів з валентної зони в зону провідності (генерація електронно-діркових пар) (рис.3.2.2).

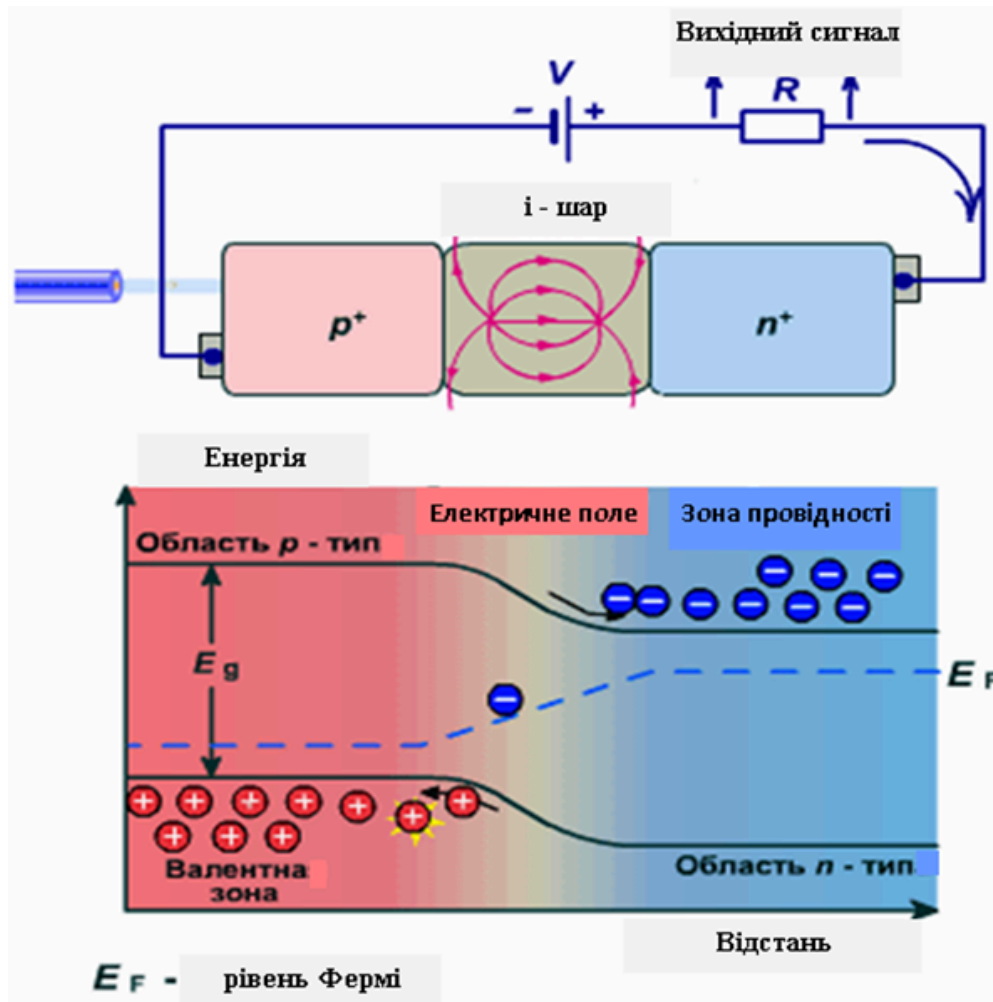


Рис.3.2.2 Схема та енергетична діаграма напівпровідникового діода

За наявності електричного потенціалу з появою електронно-діркових пар під впливом оптичного сигналу з'являється електричний струм, зумовлений рухом електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні.

Ефективна реєстрація генерованих електронно-діркових пар забезпечується шляхом поділу носіїв заряду, для чого використовується конструкція з p-n переходом (p-i-n фотодіоди (ФД), лавинні фотодіоди (ЛФД), фототранзистори). p-n перехід включений у зворотному напрямку.

Головна відмінність лавинного фотодіода (ЛФД) (рис.3.2.3) – внутрішнє підсилення сигналу, що базується на лавинному електронному множенні сигналу.

У ЛФД додається r-шар (p⁺ - i - p - n⁺ структура). Причому профіль розподілу легуючих домішок такий, щоб найбільший опір, отже, і найбільшу напруженість електричного поля мав r-шар. При дії оптичного сигналу на i-шар, як і в p-i-n фотодіоді, утворюються електронно-діркові пари. Завдяки невеликому

полю відбувається спрямований рух носіїв до полюсів. При попаданні вільних електронів з i шару в p шар вони отримують більше прискорення. Прискорюючись в зоні провідності p -шару, такі електрони накопичують достатню енергію, щоб вибити інші електрони з валентної зони в зону провідності. Це процес лавинного підсилення чи множення первинного фотоструму.

Коефіцієнт множення кілька десятків і струмова чутливість ЛФД вище, ніж у p - i - n фотодіодів.

ЛФД мають високу швидкодію, проте випадкова природа лавинного струму призводить до шуму.

Однак, у ЛФД більш висока робоча напруга порівняно з p - i - n та підвищена температурна чутливість коефіцієнта множення. Тому необхідне коло, що виробляє потрібну робочу напругу та система термостабілізації.

Передавальні та приймальні оптичні модулі виконуються конструктивно в одному блоці у вигляді змінних оптичних модулів SFP (Small Form-factor Pluggable) (рис.3.2.3).



Рис.3.2.3 Змінний оптичний модуль SFP

- Оптичні інтерфейси підтримують різні типи змінних оптичних модулів SFP (*Small Form-factor Pluggable*)
- Оптичний модуль SFP – це оптичний передавач та оптичний приймач, виконані конструктивно в одному модулі

Нижче у таблицях 3.2.1, 3.2.2 і 3.2.3, як приклад параметрів, що нормуються на передачі і прийомі, наведені характеристики оптичних інтерфейсів сигналів STM-1, STM-1, STM-1.

Мінімальний рівень чутливості – це мінімальний рівень оптичної потужності на прийомі, при якому коефіцієнт помилок за бітами BER (Bit Error Ratio) не гірше 10^{-12} для систем DWDM.

Для SDH значення $BER \leq 10^{-9}$

Максимальний рівень перевантаження – це максимальний рівень оптичної потужності на прийомі, при якому коефіцієнт помилок за бітами BER не гірше 10^{-12} для систем DWDM.

Мінімальний коефіцієнт гасіння лазера - це різниця в дБ між рівнями оптичної потужності лазерної “одиниці” і лазерного “нуля” інформаційного сигналу.

Таблиця 3.2.1 Загальні параметри оптичних інтерфейсів STM-1

Назва параметра	Од. вимір	Значення параметра									
1. Номінальна швидкість	кбіт/с	STM-1 - 155 520									
2. Код використання		I-1	S-1.1	S-1.2		L-1.1	L-1.2	L-1.3			
1	2	3	4	5		6	7	8			
3. Діапазон робочих довжин хвиль	нм	1260 - 1360	1261 - 1360	1430 - 1570	1430 - 1580	1280 - 1335	1480 - 1580	1534 - 1566 (1523 - 1577)	1480	1480	1480
4. Передача (т.S)		MLM	LED	MLM	MLM	SLM	MLM	SLM	SLM	MLM	SLM
4.1 Тип джерела випромінювання		MLM	LED	MLM	MLM	SLM	MLM	SLM	SLM	MLM	SLM
4.2 Спектральні характеристики:											
- максимальна ширина (сер.-кв. значення)	нм	40	80	7.7	2.5	-	4	-	-	3(2.5)	-
- максимальна ширина на рівні -20 дБ	нм	-	-	-	-	1	-	1	1	-	1
- мінімальний коефіцієнт придушення бокової моди	дБ	-	-	-	-	30	-	30	30	-	30
4.3 Потужність випромінювання:											
- максимальна	дБм	-8	-8	-8	-8	-	0	-	0	0	-
- мінімальна	дБм	-15	-15	-15	-15	-	-5	-	-5	-5	-
4.4 Мінімальний коефіцієнт гасіння лазера	дБ	8,2	8.2	8,2	8.2	-	10	-	10	10	-
5. Оптичний тракт між т.S і т.R											
5.1 Діапазон загасань	дБ	0 - 7	0 - 12	0 - 12	0 - 12	10 - 28	10 - 28	10 - 28	10 - 28	10 - 28	10 - 28
5.2 Максимальна дисперсія	пс/нм	18	25	96	296	ПВ	185	ПВ	ПВ	248 (296)	ПВ
5.3 Мінімальне загасання неузгодженості в т. S	дБ	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ	20	ПВ	ПВ	ПВ
5.4 Максимальний рівень відбиття між т.S і т.R	дБ	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ	-28	ПВ	ПВ	ПВ
6. Прийом (т. R)											
6.1 Мінімальний рівень чутливості	дБм	-23	-28	-28	-28	-	-34	-	-34	-34	-34
6.2 Мінімальний рівень перевантаження	дБм	-8	-8	-8	-8	-	-10	-	-10	-10	-10
6.3 Максимальні втрати оптичної потужності у станційних колах	дБ	1	1	1	1	-	1	-	1	1	1
6.4 Максимальний рівень відбиття в т.R	дБ	ПВ	ПВ	ПВ	ПВ	-	ПВ	-	ПВ	ПВ	ПВ
Примітка. ПВ – підлягає вивченню											

Таблиця 3.2.2 Загальні параметри оптичних інтерфейсів STM-4

Назва параметра	Од. вимір	Значення параметра							
1. Номінальна швидкість	кбіт/с	STM-4 – 622 080							
2. Код використання		I-4	S-4.1	S-4.2	L-4.1	L-4.2	L-4.3		
1	2	3	4	5	6	7	8		
3. Діапазон робочих довжин хвиль	нм	1261-1360	1293-1334 (1274-1356)	1430-1580	1300-1325 (1296-1330)	1280-1335	1480-1580	1480-1580	
4. Передача (т.S)									
4.1 Тип джерела випромінювання		MLM	LED	MLM	SLM	MLM	SLM	SLM	SLM
4.2 Спектральні характеристики:									
- максимальна ширина (сер.-квад.значення)	нм	14,5	35	4(2,5)	-	2,0 (1,7)	-	-	-
- максимальна ширина на рівні -20 дБ	нм	-	-	-	1	-	1	менше 1	1
мінімальний коефіцієнт придушення бокової моди	дБ	-	-	-	30	-	30	30	30
4.3 Потужність випромінювання:									
- максимальна	дБм	-8	-8	-8	-8	+2	+2	+2	+2
- мінімальна	дБм	-15	-15	-15	-15	-3	-3	-3	-3
4.4 Мінімальний коефіцієнт гасіння лазера	дБ	8,2	8.2	8,2	8,2	10	10	10	10
5. Оптичний тракт між т.S і т.R									
5.1 Діапазон загасань	дБ	0 - 7	0 - 12	0 - 12	10 - 24	10-24	10-24	10 - 24	10 - 24
5.2 Максимальна дисперсія	пс/нм	13 14	46(74)	ПВ	92 109 ()	ПВ	-	ПВ	ПВ
5.3 Мінімальне загасання неузгодженості в т. S	дБ	ПВ	ПВ	24	20	24	24	20	20
5.4 Максимальний рівень відбиття між т.S і т.R	дБ	ПВ	ПВ	-27	-25	-27	-27	-25	-25
6. Прийом (т. R)									
6.1 Мінімальний рівень чутливості	дБм	-23	-28	-28	-28	-28	-28	-28	-28
6.2 Мінімальний рівень перевантаження	дБм	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
6.3 Максимальні втрати оптичної потужності у станційних колах	дБ	1	1	1	1	1	1	1	1
6.4 Максимальний рівень відбиття в т.R	дБ	ПВ	ПВ	-27	-14	-27	-27	-14	-14
Примітка. ПВ – підлягає вивченню									

Таблиця 3.2.3 Загальні параметри оптичних інтерфейсів STM-16

Назва параметра	Од. вимір	Значення параметра					
1. Номінальна швидкість	кбіт/с	STM-16– 2 488 320					
2. Код використання		I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	L-16.3
3. Діапазон робочих довжин хвиль	нм	3	4	5	6	7	8
1			1 260-1 360	1430-1335	1280-1335	1500-1580	1500-1580
4. Передача (т.S)							
4.1 Тип джерела випромінювання		MLM	SLM	SLM	SLM	SLM	SLM
4.2 Спектральні характеристики:							
- максимальна ширина (сер.-квад. значення)	нм	4	-	-	-	-	-
- максимальна ширина на рівні -20 дБ	нм	-	1	менше 1	менше 1	менше 1	менше 1
мінімальний коефіцієнт придушення бокової моди	дБ	-	30	30	30	30	30
4.3 Потужність випромінювання:							
- максимальна	дБм	-3	0	0	+3	+3	+3
- мінімальна	дБм	-10	-5	-5	-2	-2	-2
4.4 Мінімальний коефіцієнт гасіння лазера	дБ	8,2	8.2	8,2	10	10	10
5. Оптичний тракт між т.S і т.R							
5.1 Діапазон загасань	дБ	0 - 7	0 - 12	0 - 12	10 - 24	10-24	10 - 24
5.2 Максимальна дисперсія	пс/нм	12	ПВ	-	ПВ	1200	-
5.3 Мінімальне загасання неузгодженості в т. S	дБ	24	24	27	24	24	24
5.4 Максимальний рівень відбиття між т.S і т.R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27	-27
6. Прийом (т. R)							
6.1 Мінімальний рівень чутливості	дБм	-18	-18	-18	-27	-28	-27
6.2 Мінімальний рівень перевантаження	дБм	-3	0	0	-9	-9	-9
6.3 Максимальні втрати оптичної потужності у станційних колах	дБ	1	1	1	1	2	1
6.4 Максимальний рівень відбиття в т.R	дБ	-27	-27	-27	-27	-27	-27
Примітка. ПВ – підлягає вивченню							

3.3 Оптичні підсилювачі

Оптичні підсилювачі (Optical amplifier) - пристрої, що забезпечують збільшення потужності оптичного випромінювання. Підсилення оптичного сигналу в оптичних каналах і системах здійснюється за рахунок енергії зовнішнього джерела.

Основою підсилювача є активне фізичне середовище, в якому за рахунок енергетичного накачування збільшується потужність випромінювання. В якості активного середовища використовуються ті самі матеріали, що й у лазерах. Накачування є безперервним або імпульсним. При підсиленні може відбуватися перетворення діапазону вихідного сигналу.

У волоконно-оптичних лініях зв'язку застосовуються різні види оптичних підсилювачів:

- напівпровідникові оптичні підсилювачі,
- оптичні підсилювачі на ОВ, легованому домішками рідкісноземельних елементів,
- оптичні підсилювачі, що використовують нелінійні ефекти в ОВ (вимушене комбінаційне розсіювання (Рамана), вимушене розсіювання Мандельштама-Бріллюена, параметричне підсилення).

Найчастіше використовуються оптичні підсилювачі EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) - підсилювачі на відрізку ОВ, легованому іонами ербію (рис.3.3.1).

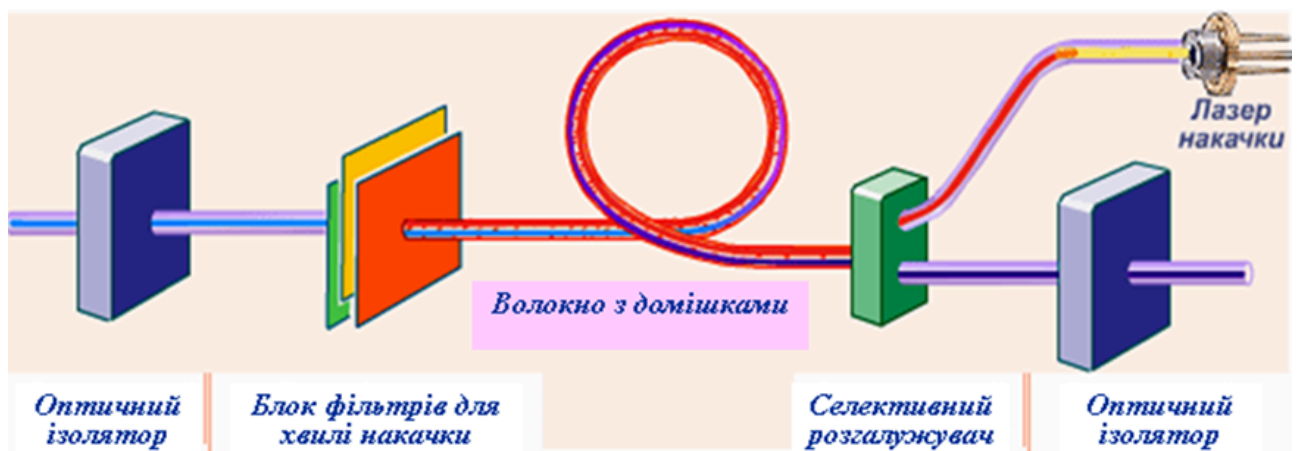


Рис.3.3.1 Оптичний підсилювач EDFA

У підсилювачі EDFA лазер накачування може здійснювати протиспрямоване (як показано на схемі) накачування або співспрямоване. У двоступінчастих підсилювачах накачування може здійснюватися з двох сторін для поєднання переваг спів- і протиспрямованого накачування.

Оптична накачка необхідна для переводу іонів ербія в збуджений стан.

Оптичні ізолятори (пристрої, що пропускають оптичні сигнали тільки в одному напрямку) на вході та виході підсилювача застосовуються для того, щоб запобігти проникненню в підсилювач паразитних сигналів, відбитих від неоднорідностей лінії зв'язку. Відбиті сигнали є джерелом шумів, що погіршують роботу підсилювача.

У багатоступінчастих підсилювачах ізолятори, що поділяють на ділянки EDFA, забезпечують ефективне зниження оптичного шуму підсилювача.

Принцип роботи ербієвого підсилювача базується на явищі підсилення оптичного сигналу при вимушеному випромінюванні (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Підсилення оптичного сигналу в ербієвому підсилювачі відбувається завдяки переходу між енергетичними рівнями А-В-С-А (рис.3.3.2). Кожен із цих рівнів розщеплений на ряд підрівнів через взаємодію іонів ербію із внутрішньокристалічним полем кварцового скла (ефект Штарка). Під дією енергії накачування за рахунок поглинання фотонів накачування іони ербію переходять з основного стану (рівень А) у верхній збуджений стан (рівень В), який є короткоживучим (час життя $V = 1$ мкс), і за рахунок процесів релаксації переходять у довготривалий стан на метастабільний рівень енергії (рівень З). Термін метастабільний означає, що час перебування іона ербію на цьому рівні енергії (час життя) відносно велике ($\tau_C = 10$ мс, тобто $\tau_C = 10\,000\tau_B$). Тому кількість іонів, що знаходяться на рівні С, при відповідній потужності накачування може перевищувати кількість іонів на основному рівні А.

Рівень А називається основним станом, тому що без накачування практично всі іони ербію знаходяться на цьому енергетичному рівні, тобто населеність основного рівня енергії речовини максимальна, населеності всіх інших рівнів енергії швидко зменшуються зі збільшенням енергії рівня.

Число іонів в одиниці обсягу, що знаходяться на певному рівні енергії, називається **населеністю** цього рівня енергії.

Стан середовища, у якому населеність деякого вищого рівня енергії іона перевищує населеність деякого нижчого рівня, є незвичайним і отримав назву стану з інверсією населеностей рівнів, чи, коротше, **інверсією населеності**.

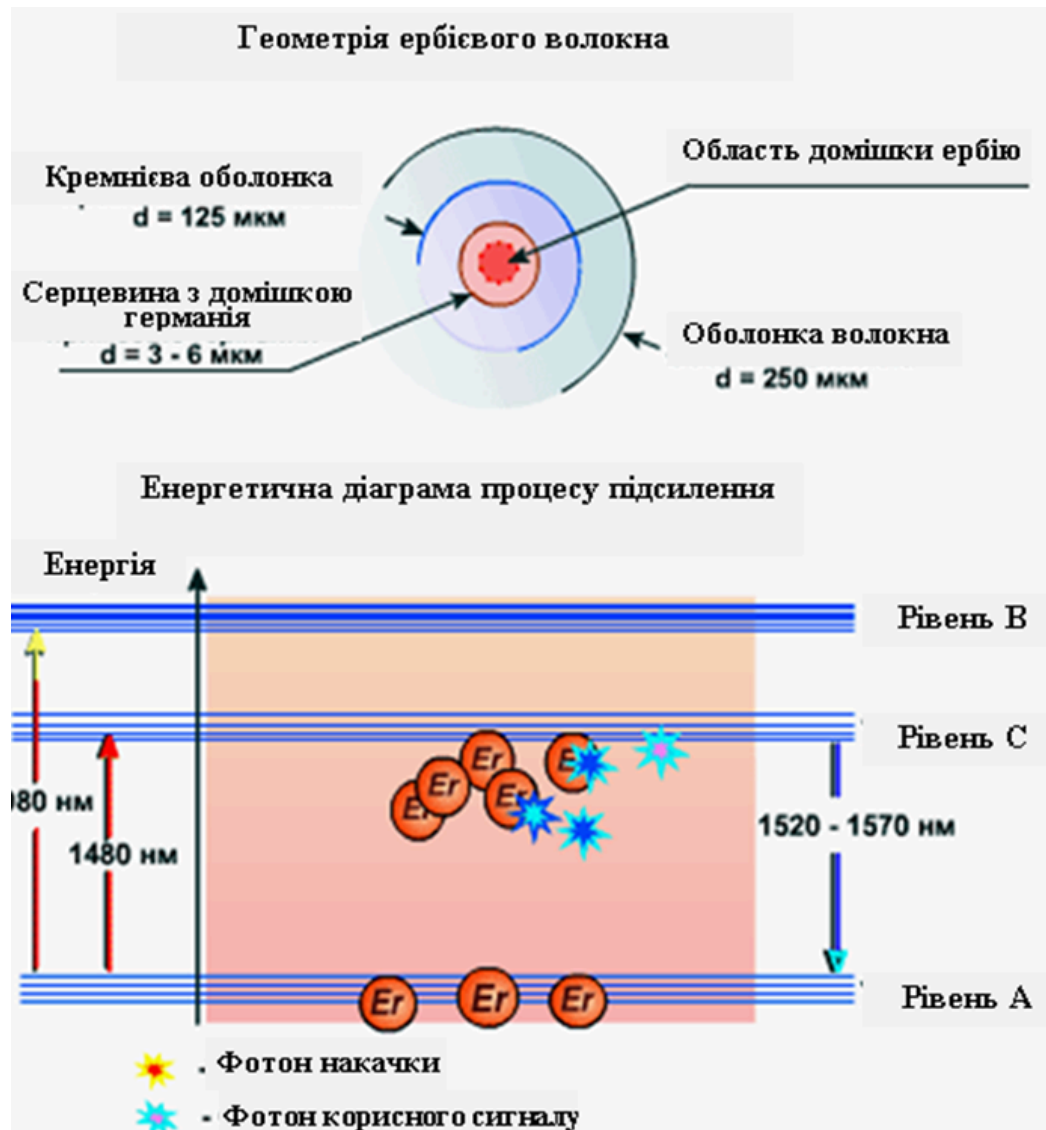


Рис.3.3.2 Енергетична діаграма процесу підсилення в ербієвому підсилювачі

Якщо в середовище з інверсією населеності потрапляє випромінювання (випромінювання корисного сигналу) з енергією фотона, що збігається з енергією переходу з метастабільного стану в основний, то з великою ймовірністю

відбувається перехід іона з метастабільного рівня на основний рівень А з одночасним народженням ще одного фотона (стимульована емісія).

Збільшення числа фотонів за їх взаємодії з іонами ербія означає, що відбувається підсилення оптичного сигналу, що поширюється в середовищі з інверсією населеності.

Необхідно зазначити, що довжина хвилі та спектр підсилення жорстко визначені типом активних іонів. Те, що спектр підсилення волокна, легованого іонами ербію, збігається з областю мінімальних втрат кварцового ОВ є вдалим збігом.

Не всі іони ербію перебувають у метастабільному стані та забезпечують підсилення. Частина іонів знаходиться на рівні А і ці іони, взаємодіючи з фотонами, енергія яких збігається з енергією переходу, ефективно поглинають їх, переходячи на рівень С. При цьому спектр підсилення іонів ербія практично збігається зі спектром поглинання. Якщо кількість іонів, що знаходяться на рівні С, менша за кількість іонів, що знаходяться на основному рівні А, спостерігається поглинання. Саме тому необхідною умовою підсилення світла є створення інверсії населеності між двома робочими рівнями енергії С та А.

За відсутності сигналу, що підсилюється, іони ербія переходять в основний стан мимовільно, випромінюючи фотони з енергією, що відповідає даному переходу. Тобто, з'являється спонтанне випромінювання. І в робочому режимі за наявності сигналу, що підсилюється, частина збуджених іонів переходить в основний стан спонтанно, при цьому спонтанне випромінювання також підсилюється, приводячи до появи підсиленого спонтанного випромінювання.

Підсилене спонтанне випромінювання є основним джерелом шумів, а також обмежує коефіцієнт підсилення, особливо у разі слабкого сигналу.

Оптична накачка, необхідна для переводу іонів ербія в збуджений стан, здійснюється на довжинах хвиль, що відповідають одній з їх смуг поглинання. Ефективність використання накачування визначається максимальним значенням відношення коефіцієнта підсилення до потужності накачування, для кількох смуг поглинання. Найбільша ефективність на 980 та 1480 нм. Розроблено пристрої накачування з потужністю кілька сотень мВт, введеної в ОМ волокно. Велика

потужність накачування потрібна для забезпечення високого коефіцієнта підсилення одночасно великої кількості інформаційних каналів у системах із спектральним розділенням каналів (DWDM).

Принциповим є вибір легуючих добавок, що формують серцевину активного світловоду, а також підбір концентрації іонів ербію. Різні добавки в кварцове скло змінюють характер Штарківського розщеплення рівнів енергії іонів ербію. Це призводить до зміни спектрів поглинання та випромінювання.

Концентрація іонів ербія в серцевині ОВ фактично визначає його довжину, що використовується в підсилювачі при заданих рівнях сигналу та накачування.

Верхня межа концентрації активних іонів визначається появою ефекту кооперативної апконверсії. Цей ефект полягає у тому, що за великої концентрації активних іонів можливе утворення кластерів, які складаються з двох і більше іонів ербія. Коли ці іони опиняються у збудженому стані, відбувається обмін енергіями, внаслідок чого один із них переходить у стан із ще вищою енергією, а другий – без випромінювання релаксує на основний рівень. Таким чином, частина іонів ербію поглинає випромінювання підсиленого сигналу, знижуючи ефективність підсилювача.

Нижня межа концентрації іонів ербія визначається тим, що дуже довгий активний світловод незручний при виготовленні підсилювача, а також тим, що при використанні великої кількості активного світловода підвищується вартість підсилювача. Насправді концентрація іонів ербія становить $10^{18} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$, що забезпечує довжину використовуваного активного світловода від кількох одиниць до кількох десятків метрів.

Є різновиди підсилювачів EDFA на кремнієвій основі та на фтор-цирконатній. У підсилювачах на кремнієвому волокні підсилення багатоканального оптичного сигналу пов'язано з однією технологічною проблемою – нерегулярністю коефіцієнта підсилення як функції довжини хвилі (рис.3.3.3).

Підсилювачі на фтор-цирконатній основі мають більш регулярне плато. Справа в тому, що волокно, яке містить фтор, здатне поглинути більше ербію, що і

призводить до поліпшення профілю в області 1530-1542 нм, яка відкривається для підсилення DWDM сигналу (рис.3.3.4).

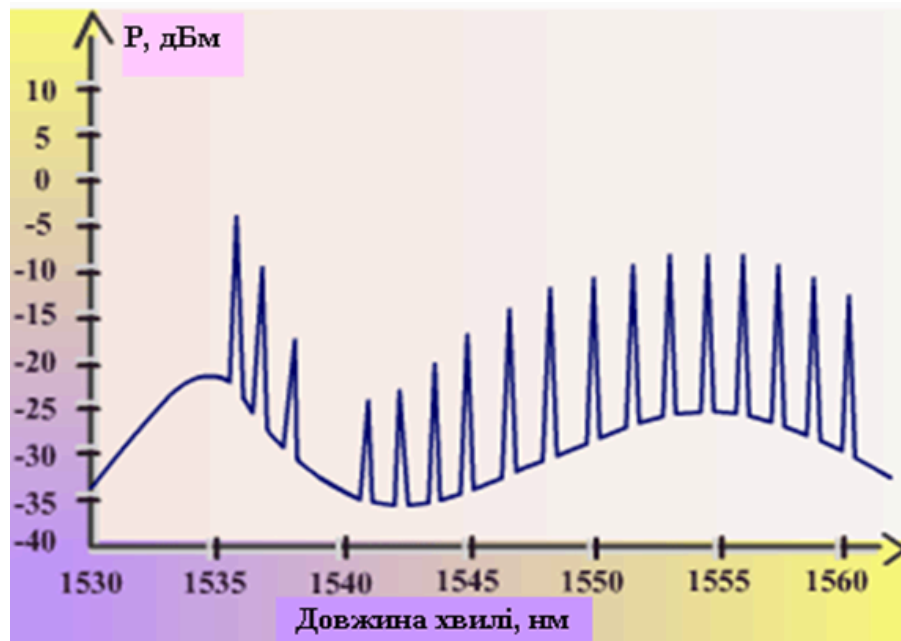


Рис.3.3.3 Підсилення DWDM сигналу у підсилувачі EDFA на кремнієвій основі

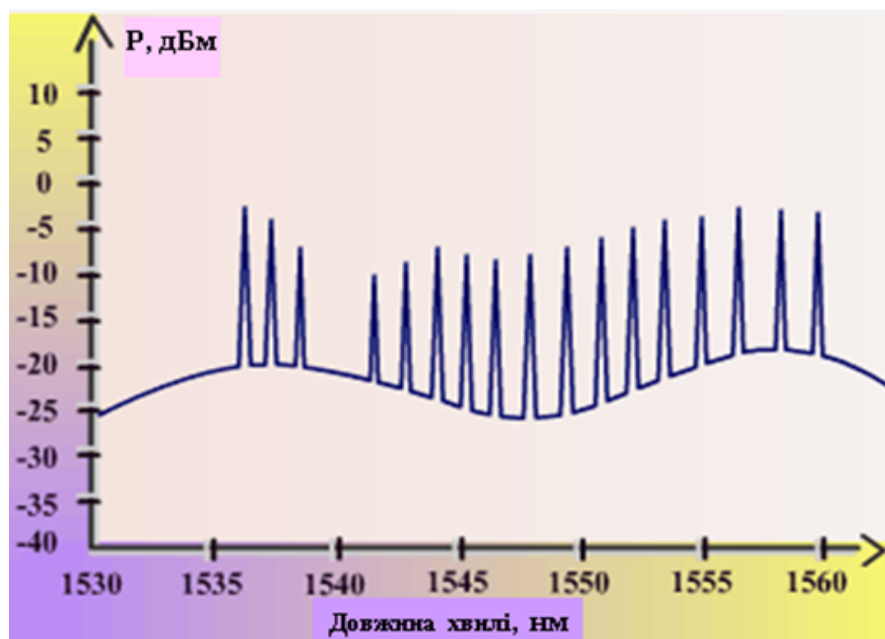


Рис.3.3.4 Підсилення DWDM сигналу у підсилувачі EDFA на фтор-цирконатній основі

Основні параметри підсилувачів:

- коефіцієнт підсилення

- вихідна потужність сигналу
- шум-фактор та потужність підсиленого спонтанного випромінювання
- спектральна ширина та рівномірність смуги підсилення

Коефіцієнт підсилення слабкого сигналу, впливом якого на величину населеностей рівнів енергії іонів ербія можна знехтувати, називається ненасиченим коефіцієнтом підсилення. Він збільшується при збільшенні потужності накачування та довжини ербієвого волокна.

У той же час необмеженому зростанню коефіцієнта підсилення перешкоджають самонасичення підсилювача підсиленням спонтанним випромінюванням та виникнення паразитної лазерної генерації.

У лабораторних умовах підсилення складає 50 дБ, для серійних підсилювачів 30 дБ для слабкого сигналу на вході. Збільшення потужності вхідного сигналу зменшує населеність метастабільного рівня С і тим самим, знижує коефіцієнт підсилення.

Вихідна потужність сигналу визначає відстань до наступного підсилювача. Тому це важливий параметр підсилювача, як і енергетична ефективність накачування – РСЕ (відношення зміни потужності сигналу до потужності накачування). Щоб забезпечити високу РСЕ необхідно, щоб практично всі фотони накачування передавали свою енергію фотонам сигналу. Відношення числа фотонів сигналу, що з'явилися в процесі підсилення сигналу, до числа поглинутих фотонів накачування називається квантовою ефективністю накачування. В даний час при накачуванні на 1480 нм досягнуто енергетична ефективність 86% при квантовій ефективності 91%. На 980 нм - енергетична ефективність 55% за квантової 86%.

Основне джерело шуму - мимовільне (спонтанне) випромінювання при переході іона ербія з метастабільного рівня енергії на основний рівень А.

Це спонтанне випромінювання підсилюється і повторно поглинається по всій довжині підсилювача приблизно так само, як слабкий сигнал, що розповсюджується підсилювачем. Саме цим пояснюється відмінність між формами спектра підсиленого спонтанного випромінювання (ASE) та спектра непідсиленого спонтанного випромінювання (SE).

Приклад параметрів оптичних підсилювачів EDFA наведений у таблиці 3.3.1.

Таблиця 3.3.1 Технічні характеристики моделей EDFA EAU-200 і EAU-350

Параметри	Мінімальне значення	Типове значення	Максимальне значення
<i>Сфера застосування</i>	<i>Аналогові та цифрові розподільні мережі, системи DWDM</i>		
Оптичні характеристики			
Зона підсилення, нм	1530		1570
Потужність насичення $P_{out\ sat}$ при $P_{in} = -3$ дБм, дБм: EAU-200 EAU-350		23,0 25,5	23,5 26,0
Коефіцієнт підсилення при малому вхідному сигналі, дБ ($\lambda = 1545$ нм)	42		
Нерівномірність коефіцієнта підсилення в діапазоні 1553-1567 нм ($P_{in} = -3$ дБм), дБ			$\pm 0,3$
Поляризаційна чутливість насиченого вхідного сигналу, дБ			0,2
Максимальне значення коефіцієнта шуму в діапазоні 1545-1565 нм, дБ при $P_{in} = -4$ дБм при $P_{in} = +4$ дБм			5,5 6,0
Поляризаційна модова дисперсія, пс			0,2
Оптична ізоляція вхід/вихід, дБ	50		
Характеристики фізичних інтерфейсів входу/виходу			
Тип вхідного/вихідного волокна	SMF-28™		
Тип оптичних з'єднувачів	FC/PC, FC/SPC, FC/APC		
Довжина pig-tail, м	1,5		
Параметри лазера накачки			
Номінальна довжина хвилі накачки, нм		965	
Смуга накачки, мкм		1×100	
Час напрацювання на відмову, годин	500000		1000000
Електричні характеристики			
Робоча напруга, В (постійний струм)	5		7
Споживана потужність при 20° С, Вт			12
Загальні характеристики			
Робочий діапазон температур, °С	-30		+65
Температура зберігання, °С	-30		+80
Час прогріву до повної стабілізації, хвилин			3
Вологість, %	0		95

Розміри, мм		115×21×1 65	
Маса, кг		0,3	

Контрольні питання

1. Чим відрізняються лазерні діоди (ЛД) від світловипромінюючих (СВД)?
2. Зазначити ширину спектра випромінення ЛД та СВД
3. Чим відрізняються одномодові і багатомодові лазерні діоди. Назвати їх спектральні характеристики
4. Пояснити вигляд ватт-амперної характеристики лазерного діоду
5. Які параметри ЛД контролює система управління обладнання і чому?
6. Який фізичний принцип використовує самий простий ЛД?
7. Який з лазерних діодів має багатомодовий спектр випромінювання?
8. Відмінності лавинного та р-і-п фотодіодів
9. Який ефект лежить в основі роботи фотоприймального діода і в чому цей ефект полягає?
10. Назвати основні параметри оптичних підсилювачів EDFA
11. Яка накачка використовується для отримання найбільшої потужності EDFA і чому?

Розділ 4 Вимірювання параметрів оптичного волокна за допомогою оптичних тестерів та оптичних рефлектометрів

Основними пристроями, що використовуються для вхідного контролю, тестування, знаходження пошкоджень, моніторингу параметрів тощо волоконно-оптичних ліній зв'язку є оптичні тестери та оптичні рефлектометри.

Переваги оптичних тестерів : проводяться найточніші вимірювання, тому що сигнал йде в одну сторону (це прямий сигнал, що має достатню потужність) (у порівнянні з оптичним рефлектометром); дешеві; прості у використанні, не потребують великих знань від оператора вимірювань; тестери дають відповідь на питання : працює лінія чи ні, потужність номінальна чи ні, але для вимірювань треба прилад на передачі і на прийомі.

Переваги оптичних рефлектометрів: вимірювання з одного кінця лінії; дають відповідь на питання, чому лінія не працює і яка відстань до пошкодження; але рефлектометри дорожчі; вимірюється сигнал зворотного розсіювання (Релеєвського), тобто сигнал малої потужності.

4.1 Вимірювання параметрів оптичного волокна за допомогою оптичних тестерів

Комплект оптичних тестерів може включати наступні окремі прилади:

- випромінювач оптичної потужності;
- оптичний аттенюатор;
- вимірювач оптичної потужності.

Параметри волоконно-оптичної лінії, які можна виміряти оптичними тестерами:

1. Оптичну потужність в мВт, мкВт.
2. Рівень оптичної потужності : абсолютний в дБм (dBm) (по відношенню до 1 мВт) і відносний рівень в дБ.

Абсолютний рівень потужності, в дБм (dBm)

$$p=10\lg(P_v/P_0),$$

де $P_0=1\text{мВт}$; P_v - вимірювана потужність у мВт.

Відносний рівень потужності, в дБ (dB)

$$p=10\lg(P_1/P_2),$$

де P_1 - вимірювана потужність у мВт відносно P_2 ; P_2 - потужність у мВт, з якою порівнюється P_1 .

На практиці користуються правилом: зміна оптичної **потужності в 2** рази призводить до зміни **рівня** оптичної потужності **на 3** дБ (таб.4.1.1)

Таблиця 4.1.1

Рівень оптичної потужності, дБм	Оптична потужність, мВт
6	4
3	2
0	$P_0=1\text{мВт}$
-3	0,5
-6	$0,25=250\text{мкВт}$

3. Визначити загасання лінії як $A, \text{дБ} = p_{\text{вих}} - p_{\text{вх}}$, де $p_{\text{вх}}$, $p_{\text{вих}}$ - вхідний і вихідний рівень потужності в лінії відповідно; коефіцієнт загасання в дБ/км: $A/\text{довжину лінії}$.

4. Вихідну потужність джерела випромінювання в оптичному модулі (SFP-small form-factor pluggable).

5. Чутливість приймача оптичного модуля (для вимірювань потрібні: оптичний аттенюатор, вимірювач BER, вимірювач оптичної потужності). Схема для вимірювання чутливості наведена на рис.4.1.1.

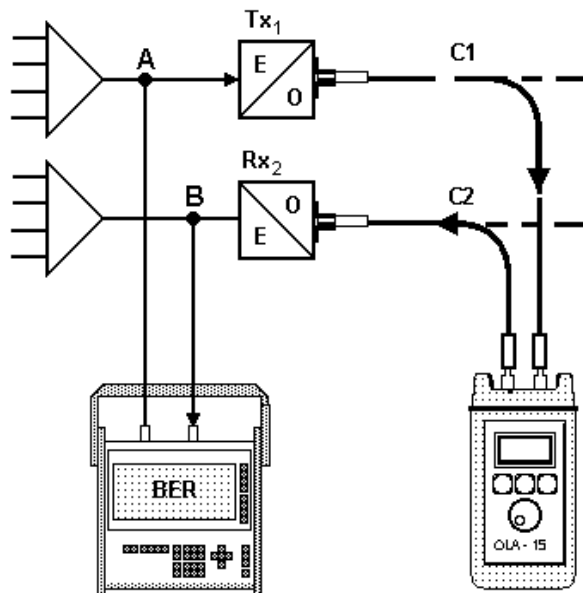


Рис.4.1.1 Схема для вимірювання чутливості приймача оптичного модуля

Чутливість оптичного приймача - це мінімальний рівень оптичної потужності на прийомі, при якому виконується заданий коефіцієнт помилок BER (Bit Error Ratio).

Рівень перевантаження оптичного приймача - це максимальний рівень потужності на прийомі, при якому виконується заданий коефіцієнт помилок BER.

На рис. 4.1.2 наведено приклад комплекта оптичних тестерів, де OLS - джерело оптичного випромінювання, OLA - оптичний атенюатор, OLP - вимірювач оптичної потужності. Характеристики кожного з приладів розглянуті нижче.

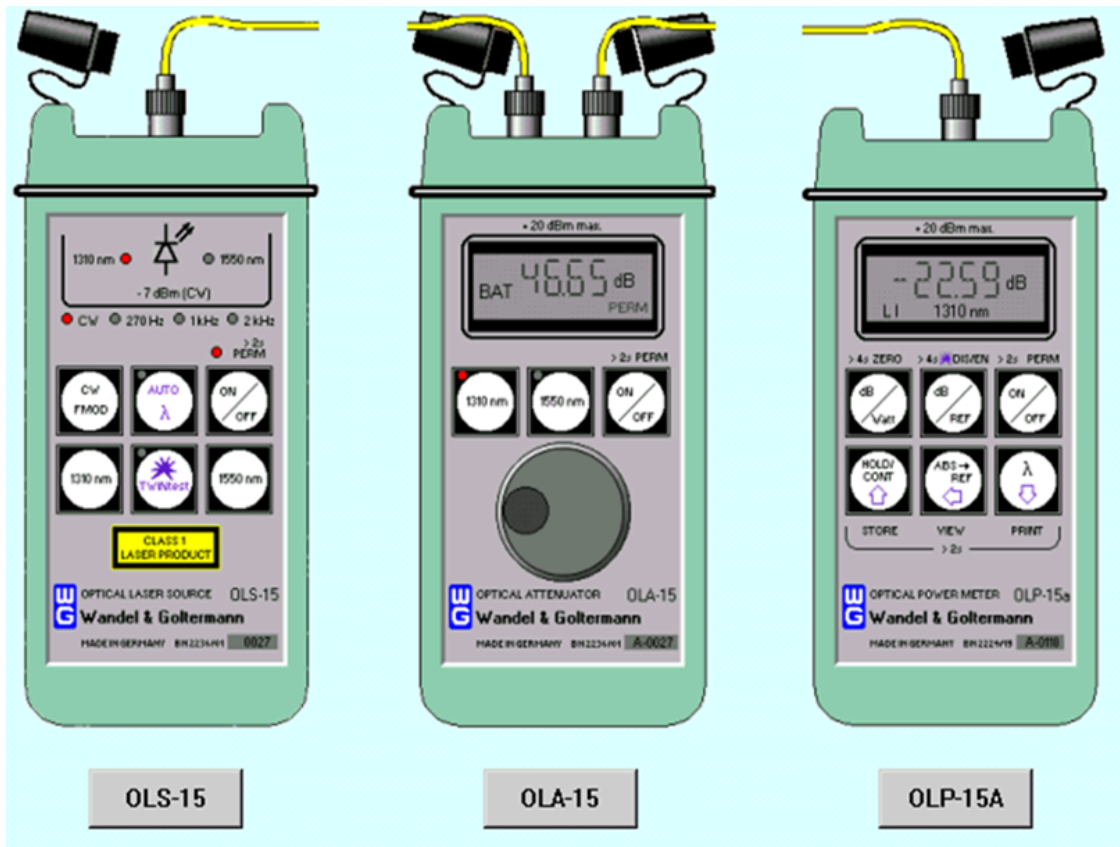


Рис. 4.1.2 Комплект оптичних тестерів

Оптичні лазерні випромінювачі призначені для проведення вимірювань в оптичних системах як самостійно, так і разом з іншими приладами (атенюаторами та вимірювачами оптичної потужності). Можуть працювати на одній довжині хвилі, або на двох (OLS-15). При роботі на двох довжинах хвиль прилад має два лазерних діода, випромінення від яких виводиться через загальний вимірювальний порт.

В приладі OLS-15 передбачено циклічне (4сек) перемикання довжин хвиль (режим TwinTest), що дозволяє без перемикань у вимірювачі потужності здійснювати вимірювання загасань на двох робочих довжинах хвиль (якщо такий режим підтримується у вимірювачі потужності (OLP-15A)). Також вимірювач OLP-15A автоматично визначає вимірювану довжину хвилі, якщо випромінювач OLS-15 працює в режимі Autoλ.

У випромінювачі реалізовані режими немодульованого (режим CW) та модульованого (режим FMOD) випромінювання, що є важливим в умовах

наявності зовнішнього (фонового) засвічення. Також це є корисним при ідентифікації модулів оптичного кабелю.

У вихідному порту передбачений вимірювальний адаптер, що дозволяє під'єднувати оптичні роз'єми різних типів.

Основні технічні параметри приладів наведені у таблиці 4.1.1.

Таблиця 4.1.1 Параметри оптичних випромінювачів

Параметри	OLS - 15	OLS - 16	OLS - 17
Тип лазерного діоду	З резонатором Фабрі-Перо та вбудованим оптичним кабелем (pigtail) 9/125 мкм		
Робоча довжина хвилі, нм	1310±20 1550±20	1310±20	1550±20
У двоххвильовому режимі TWINtest	1310,1550 з циклом 4 сек		
Ширина спектру випромінювання, нм	< 5		
Рівень вихідної потужності, дБм: Безперервне випромінювання CW – Continuous Wave), Модульоване випромінювання	-7 -10		
Стабільність вихідного рівня потужності, дБ: Короткочасна (15 хв. при t=-10...+50°C, Dt=±3°K) Тривала (8 годин при t=-10...+50° C, Dt=±3°K)(FMOD)	±0,02 ±0,02		
Сумарна зміна рівня вихідної потужності з урахуванням зміни потужності в роз'ємі вихідного порта при t=-10...+50° C, дБ	±1		
Форма модулюючого сигналу в режимі внутрішньої модуляції (FMOD)	Прямокутний імпульс		
Коефіцієнт заповнення імпульсу	1:1		

Стандартні частоти модуляції в режимі ідентифікації ліній (LINE ID)	270 Гц, 1 кГц, 2 кГц
Для режимів AUTOI і TWINtest	350 Гц (1310 нм), 550 Гц (1550 нм)

Корпус приладу виготовлений з високоміцної пластмаси, що дозволяє використовувати прилад як у стаціонарних, так і у польових умовах. Електроживлення може здійснюватися від хімічних джерел та від мережі змінного струму.

На верхній торцевій поверхні розташований вихідний вимірювальний порт (рис.4.1.3), що забезпечує під'єднання приладу до схеми вимірювань з урахуванням типів використовуємих оптичних роз'ємів.

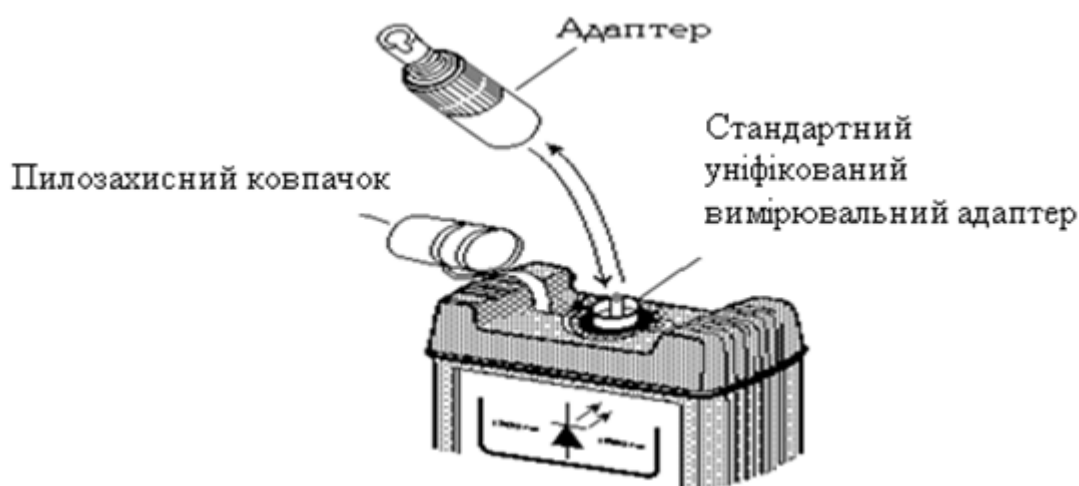


Рис. 4.1.3 Конструкція вихідного вимірювального порта

У неробочому стані стандартний вимірювальний адаптер при ладу повинен бути закритий пилозахисним ковпачком, а вимірювальний адаптер повинен зберігатися у захисній капсулі. Забороняється торкатися руками до торцевої поверхні штекера адаптера, бо це може призвести до її забруднення, підвищення внесеного загасання і відбиття та суттєвому зниженню точності вимірювань. Також забороняється торкання жорсткими предметами, бо це може призвести до утворення мікроцарапин та погіршення параметрів оптичного роз'єму.

Вимірювання загасання волоконно-оптичної лінії проводять методом внесеного загасання, який полягає у виконанні двох кроків:

1 крок – калібровка, коли OLS безпосередньо підключається до OLP (рис.4.1.4);

2 крок – самі вимірювання, коли між OLS та OLP вноситься (підключається) загасання вимірюваного ОВ (рис.4.1.5).

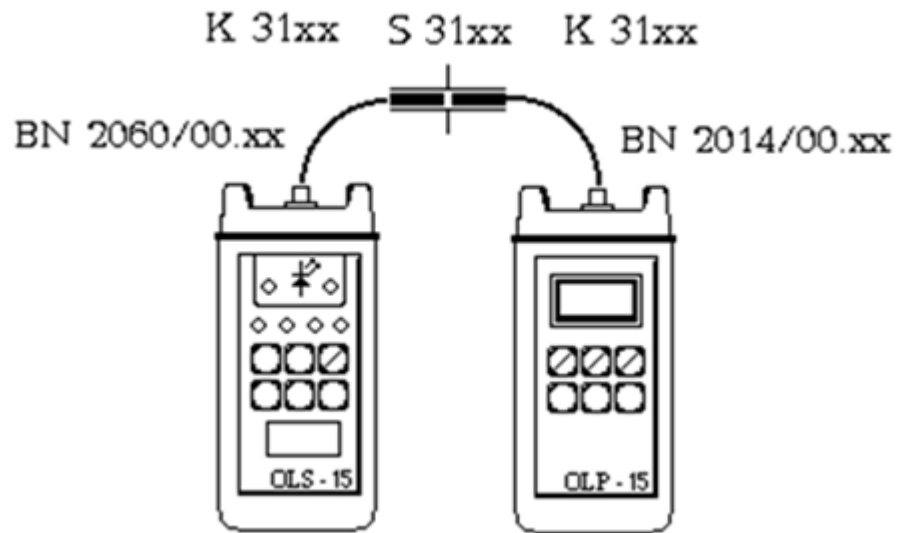


Рис. 4.1.4 Схема калібровки

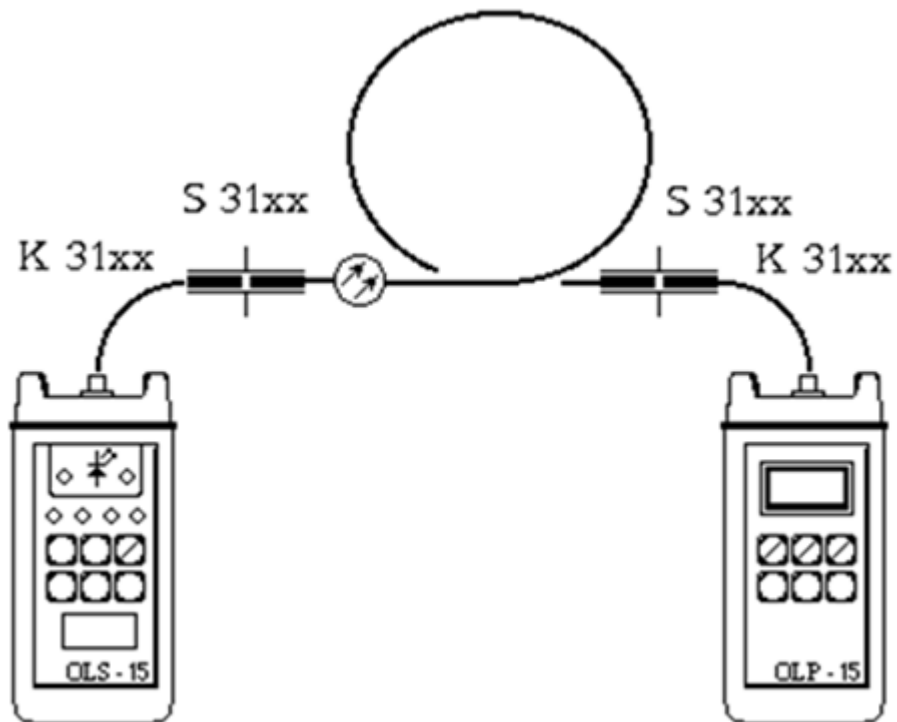


Рис. 4.1.5 Схема вимірювання загасання методом внесеного загасання

При виконанні калібровки після підключення приладів на екрані вимірювача оптичної потужності OLP буде відображено значення рівня оптичної потужності випромінювача OLS у дБм. Це значення потрібно занести до пам'яті приладу OLP натисканням кнопки dB/REF, при цьому на екрані з'явиться значення 0,00 dB, тобто виконаний перехід до режиму вимірювання відносного рівня потужності (відносно значення, занесеного до пам'яті). Далі виконуються самі вимірювання внесенням ОВ між приладами OLS і OLP згідно схеми на рис.4.1.5. І на дисплеї OLP відобразиться загасання лінії.



Кнопка ON/OFF забезпечує 2 режими роботи приладу – короткочасний (при утриманні її у натиснутому стані менше 2 сек) та тривалий (при утриманні у натиснутому стані більше 2 сек).

Після закінчення 20 хвилин у короткочасному режимі роботи для економії ресурсів хімічних елементів прилад автоматично вимикається. При тривалому режимі роботи світиться червоний світлодіод біля напису PERM (Permanent).

При натисканні кнопки ON/OFF за умовчанням вмикається випромінювання на довжині хвилі 1310 нм та режим безперервного випромінювання CW, при цьому біля написів 1310 та CW світяться світлодіоди.



Кнопка CW/FMOD перемикає циклічно режим безперервного (немодульованого) випромінювання і режими модульованого з різними частотами модуляції випромінювання, як зображено на рисунку 4.1.6.

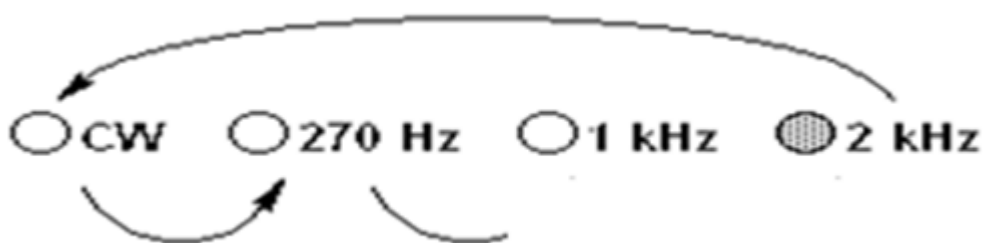


Рис.4.1.6 Послідовність перемикавання режимів випромінювання

Оптичний атенюатор OLA-15 забезпечує регульоване внесення втрат від 3 до 60 дБ з дискретністю встановлення 0,05 дБ. Показники внесених втрат відображаються на дисплеї приладу.

Оптичні вимірювачі потужності OLP призначені для вимірювання рівнів безперервного та модульованого оптичного випромінювання на виході оптичних ліній, що використовують різні типи ОМ та БМ кабелів. У приладах передбачений широкий набір адаптерів для підключення кабелів. Фотоприймачі приладів забезпечують детектування оптичних сигналів у широкому діапазоні довжин хвиль, що відносяться до різних вікон прозорості ОК.

Прилади також дозволяють здійснювати ідентифікацію оптичних модулів ОК, ідентифікацію ліній, вимірювання значень граничної чутливості приймачів (за критерієм перевищення допустимого коефіцієнта помилок).

Вимірювач оптичної потужності має наступні елементи керування:



Кнопка dBm/Watt : перемикає шкали відліків: логарифмічну та лінійну з використанням одиниць вимірювання відповідно dBm і Watt.



Кнопка dB/REF : перемикає режими відліку в одиницях відносних рівнів (dB) або вимірювальних (REF) рівнів. Додатковою функцією для OLP є увімкнення/ вимкнення детектора модульованого випромінювання.



Кнопка HOLD/CONT : перше натискання кнопки реалізує функцію HOLD - утримання незмінним відліку поточного значення вимірюваної величини, що виведена на дисплей. Друге натискання реалізує функцію CONT (продовжити). Відміняє функцію HOLD, так що на дисплеї відображається дійсне поточне значення вимірюваної величини. Додаткова функція (за тривалого натискання на цю кнопку на протязі не менше 2 сек) - це збільшення десяткових розрядів у значенні вимірювального рівня (REF-рівня).



Кнопка ABS-> REF : перше натискання кнопки реалізує функцію встановлення останнього виміряного значення рівня вхідного сигналу в якості вимірювального рівня (REF-рівня). Друге натискання тривалістю не менше 2 сек дозволяє обирати десятковий розряд у значенні REF-рівня, яке користувач бажає змінити, встановлюючи нове значення REF-рівня.



Кнопка λ змінює довжину хвилі, на яку налаштований вимірювач оптичної потужності (850, 1300, 1310, 1550 нм), відображаючи відповідне значення на дисплеї.

Перед виконанням вимірювань на приладі вимірювача оптичної потужності обов'язково треба виставити довжину хвилі λ вимірювань, тому що фотоприймач приладу є широкосмуговим і реагує на весь діапазон 850-1625 нм, навіть на діапазон видимого світла, тобто на дисплеї будуть відображатися якісь значення. Щоб виміри були вірними треба встановити λ , де значення вимірювань будуть відкалібровані.

Контрольні питання

1. Які прилади входять до комплекту оптичних тестерів і які параметри можна виміряти цим комплектом?
2. Які параметри, режими нормуються для джерела випромінювання OLS оптичних тестерів?
3. Чому в модульованому режимі в OLS рівень потужності менше, ніж в безперервному?
4. Визначення чутливості оптичного приймача
5. Чим рівень чутливості оптичного приймача відрізняється від рівня перевантаження?
6. Головні відмінності вимірювань оптичними тестерами та оптичними рефлектометрами
7. На вході оптичної лінії сигнал 100 мВт, на виході 1 мВт. Зазначити загасання лінії в дБ з поясненнями і розрахунками
8. Чим відрізняються абсолютний і відносний рівень оптичної потужності?
9. Як здійснюється вимірювання загасання лінії методом вносимого загасання?
10. Чому дорівнює вихідна потужність підсилювача в мВт, якщо рівень потужності 20 дБм?
11. Як виміряти чутливість оптичного приймального модуля за допомогою оптичних тестерів?
12. Які параметри, режими нормуються для джерела OLS оптичних тестерів?

4.2 Вимірювання параметрів оптичного волокна за допомогою оптичних рефлектометрів

Оптичні рефлектометри призначені для вимірювання загасання в оптичних волокнах (ОВ) та їх з'єднаннях, довжини ОВ та відстані до місць неоднорідностей оптичного кабелю та ОВ у волоконно-оптичних системах передачі.

Рефлектометри може застосовуватися під час виробництва ОВ та оптичних кабелів, а також монтажі та експлуатації волоконно-оптичних ліній зв'язку для контролю стану кабелів та прогнозування несправностей у них.

Параметри оптичних рефлектометрів (ОР) та процес вимірювання параметрів ОВ розглянуті нижче на прикладі конкретного рефлектометра ОР-2-2.

Рефлектометр може працювати в лабораторних та польових умовах.

Технічні характеристики ОР-2-2:

Оптичні модулі: ОМ – 1,31 мкм – А (одномодовий), де $1,31 \pm 0,02$ мкм - довжина хвилі випромінювання лазерного діоду;

ОМ – 1,55 мкм – А (одномодовий), де $1,55 \pm 0,02$ мкм - довжина хвилі випромінювання лазерного діоду.

Діапазони вимірюваних відстаней: 2; 5; 10; 20; 40; 80 км для багатомодових ОВ; 2; 5; 10; 20; 40; 80, 120, 160, 240 км для одномодових ОВ.

Рефлектометр ОР-2-2 надає можливість встановлення різних значень тривалості зондувальних імпульсів 10, 30, 90, 300, 1000, 3000, 10000, 20000 нс для вимірювання різних відстаней (таб. 4.2.1)

Таблиця 4.2.1

Діапазон вимірюваних відстаней, км	Допустима тривалість зондуючого імпульсу, нс
2	10, 30, 90
5	10, 30, 90, 300
10, 20	10, 30, 90, 300, 1000
40	10, 30, 90, 300, 1000, 3000
80, 120	10, 30, 90, 300, 1000, 3000, 10000
160, 240	10, 30, 90, 300, 1000, 3000, 10000, 20000

При вимірюванні рефлектометрами всіх типів треба зважати на похибки, що виникають при вимірюванні відстані і вимірюванні загасання.

Похибка при вимірюванні відстані

Інструментальна похибка вимірювання визначається як складова похибки вимірювання, зумовлена властивостями ОР. Це є суттєвим, коли йдеться про визначення місця пошкодження ОВ (ОК) в процесі контролю стану і цілісності кабелю ВОЛЗ. Розуміння сутності складової інструментальної похибки ОР допомагає визначати відповідність між відстанями, отриманими в процесі вимірювань рефлектометром, та реальними відстанями між характерними точками на ОВ (ОК).

Згідно з принципом роботи ОР перевірка за шкалою відстаней полягає в тому, що фізично оцінюють значення не довжин, а відповідних їм часових інтервалів між ділянками рефлектограми.

Вимірюючи довжину ОВ за допомогою ОР, автоматично перераховується час проходження зондуючого імпульсу по ОВ в значення фізичної довжини:

$$L_{ОВ} = c\Delta t / (2N),$$

де Δt - часовий інтервал поширення імпульсів;

N - груповий показник заломлення ОВ.

У реальних оптичних рефлектометрах похибки вимірювання відстані $L_{ОВ}$ виникають внаслідок похибок шкали часу через зсув початку відліку ОР та через похибки у визначенні характерних точок відносно точок початку відліку.

Для визначення похибок відстані або місця розташування існує спеціальна модель, яка описує поведінку більшості ОР: $L_{баз}$ - базове, тобто точно визначене, місце знаходження деякої характерної точки від роз'єму рефлектометра, а $L_{реф}$ - відповідне місце знаходження, що його відображає ОР. $L_{реф}$ функціонально залежить від базового місцезнаходження $L_{баз}$:

$$L_{реф} = S_L \cdot L_{баз} + \Delta L_0 + \delta,$$

де S_L - похибка шкали ОР; ΔL_0 - зсув місцезнаходження; δ - похибка відстані між точками виміру.

Похибка відстані між точками виміру є періодичною функцією зі значенням і періодом, що дорівнює відстані між точками взяття відліків ОР.

Результатом калібрування ОР за відстанню є визначення таких складових похибки як похибки шкали часу та початкового місцезнаходження.

На практиці виробники ОР визначають межі значень основної похибки відповідно до наведеної моделі з формулою:

$$\Delta = \pm(dl + k \cdot L + \delta_{\text{чит}}),$$

де L - вимірювана відстань, м; dl - складова похибки ОР, що виникає внаслідок зміщення початку шкали відстаней ОР; k - коефіцієнт, що визначає нелінійність шкали відстаней ОР; $\delta_{\text{чит}}$ - дискретність зчитування на діапазоні розглянутої шкали відстаней (відстань між точками взяття відліків).

Параметри dl , k , $\delta_{\text{чит}}$ - відповідають значенням, наведеним у технічній документації на конкретний ОР.

В окремих випадках у документах на ОР складова $\delta_{\text{чит}}$ не враховується, що призводить до грубих помилок при розрахунку значень інструментальної похибки.

Нині у світовій практиці існує кілька методів калібрування ОР за відстанню. Нормуючи шкалу відстані, застосовують пасивні та активні методи. У першому випадку використовують міри, вироблені на основі пасивних волоконно-оптичних елементів - комбінації відрізків ОВ, атенуаторів тощо. У другому випадку - оптоелектронні пристрої, що моделюють проходження оптичного сигналу по ОВ. Ці оптоелектронні пристрої містять активні елементи: фотоприймачі, генератори оптичного випромінювання на основі лазерних діодів, електронні перетворювачі, а також інші активні елементи.

Похибка вимірювання загасання

Можливість порівняння отриманих результатів за загасанням передусім визначається інструментальною похибкою ОР, що використовується у процесі оптичних вимірювань. Величина інструментальної похибки ОР за загасанням технічно визначається поєднанням кількох факторів: лінійністю встановленого лавинного фотодіода (ЛФД), якістю підсилювача фотоструму та лінійністю АЦП.

Інструментальну складову похибки загасання обчислюють за формулою:

$$\pm P = A \cdot \Delta S_A,$$

де A - значення кілометричного загасання (або загасання між двома будь-якими точками на рефлектограмі), отримане в процесі вимірювань ОВ, дБ/км; ΔS_A - похибка вимірювання потужності зворотно розсіяного сигналу ОР, дБ/дБ.

У більшості випадків на практиці відмінності в результатах вимірювань загасання виникають тоді, коли центральна довжина хвилі ОР відрізняється від номінальної на 20 нм та більше. У цих випадках можливі невідповідності результатів вимірювання коефіцієнту загасання, зумовленого нерівномірністю за загасанням у вікні прозорості ОВ, яке вимірюється. Крім того, при вимірюванні багатомодового ОВ можливі розбіжності, зумовлені тим, що загасання істотно залежить від модового складу випромінювача.

Загалом, під час вимірювання пристроями різних типів та за різних умов відхилення вимірюваного значення кілометричного загасання залежить і від багатьох випадкових чинників:

- різниця меж апроксимованих ділянок рефлектограм;
- ступінь зашумованості вимірюваних ділянок (відповідно й рівень фільтрації рефлектограми);
- тривалість імпульсів, що використовуються для вимірювання.

Відхилення вимірюваного значення коефіцієнта загасання від дійсного значення в робочих умовах виконання можуть становити:

- $\pm 0,2$ дБ/км для багатомодового ОВ в діапазоні довжин хвиль 850 нм;
- $\pm 0,06$ дБ/км для багатомодового ОВ в діапазоні довжин хвиль 1300 нм;
- $\pm 0,06$ дБ/км для одномодового ОВ в діапазоні довжин хвиль 1310 нм;
- $\pm 0,03$ дБ/км для одномодового ОВ в діапазоні довжин хвиль 1550 нм.

Похибка вимірювань для оптичного рефлектометра ОР-2-2

Межі допустимого значення абсолютної похибки вимірювання відстаней становлять

$$\Delta L = \pm (dl + dL + L \cdot \Delta n / n + 5 \cdot 10^{-5} \cdot L),$$

де $dl = 0,3$ м;

dL - роздільна здатність (інтервал дискретизації сигналу зворотного розсіювання), що визначається встановленим діапазоном вимірюваної відстані та довжини вимірюваної ділянки ОВ м; величина dL може набувати значення 0,5; 1; 3; 6; 12 та 18 м та встановлюється оператором;

L – довжина ОВ, м;

n – показник заломлення ОВ;

Δn - похибка, з якою відомий показник заломлення для вимірюваного ОВ.

Величина n може встановлюватися в діапазоні від 1,00000 до 2,00000 з кроком 0,00001.

Одними з основних параметрів будь-якого оптичного рефлектометра є динамічний діапазон та величина “мертвої зони” (відстань, в межах якої неможливо виміряти параметри ОВ, тобто ОР “не бачить” неоднорідності ОВ).

Динамічний діапазон ОР

Динамічний діапазон визначає максимальну довжину ОВ, що досліджується, і придатність рефлектометра для аналізу кожної окремої оптичної мережі.

Під час вимірювань за допомогою рефлектометра Динамічний діапазон залежить від типу ОВ та його параметрів (коефіцієнта загасання ОВ на конкретній довжині хвилі, потужності джерела випромінювання та якості фотоприймального модуля).

Чим більше динамічний діапазон, тим вище відношення сигнал/шум і тим детальнішою буде рефлектограма, з кращим детектуванням результату. Динамічний діапазон може бути визначений як різниця між точкою екстраполяції рефлектограми зворотного розсіювання в близькому кінці ОВ (взятою на перетині рефлектограми з віссю потужності) і верхнім рівнем шуму на кінці ОВ. Рівень динамічного діапазону ОР виражається у децибелах (дБ). Вимірювання виконується з трихвилинним періодом усереднення (рис.4.2.1).

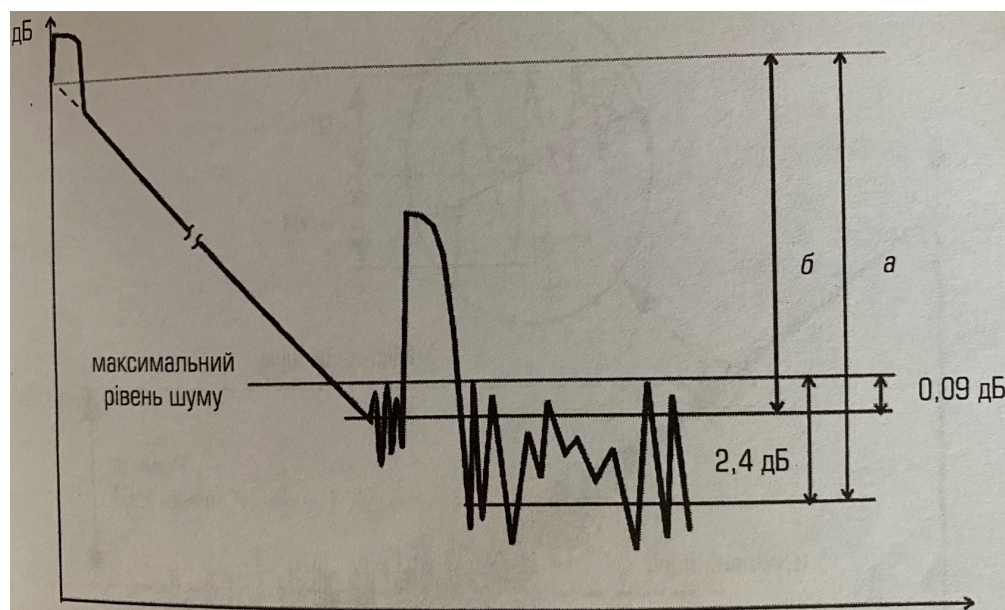


Рис.4.2.1 Визначення динамічного діапазону ОР:

а - за рівнем $C/Ш=1$; б - 98% від максимального рівня шуму

Верхній рівень шуму визначається як верхня межа коливання амплітуди, що містить доні принаймні 98% усіх шумових точок (IEC 61746). Інше визначення ґрунтується на звичайному способі подання межі шуму за рівнем його середньоквадратичного значення (RMS) - $SNR=1$.

Визначення 98% слід розглядати як більш реальне, оскільки в ньому йдеться про те, де саме сигнал візуально досягає верхнього рівня шуму. Проте RMS-значення динамічного діапазону (ДД) має величезну перевагу: воно надає більші величини. Різниця абсолютних значень ДД між RMS і 98% змінюється залежно від виробника в діапазоні від 1,5 до 4 дБ. Незалежно від шумового значення ДД тільки визначає втрати від загасання між двома рівнями на рефлектограмі ОР (від максимального рівня сигналу до нижньої межі шуму). Але чим ближче сигнал до шумової межі, тим більш зашумленим він стає. Наприклад, якщо візуально оглянути рефлектограму ОР на 6,6 дБ вище шумового порогу, можна побачити, що шум, сформований на рефлектограмі, має амплітуду $\pm 0,1$ дБ.

Якщо рухатися ближче до шумового порогу ще на 3 дБ, шумова амплітуда на рефлектограмі збільшується до рівня від 0,5 до 0,6 дБ. Теоретичний місцевий рівень шуму відповідно до межі "загасання сигналу до шумового порогу" наведено на рис.4.2.2. Крім того, ДД не надає ніякої інформації щодо точності вимірювання, виконаного в цьому діапазоні.

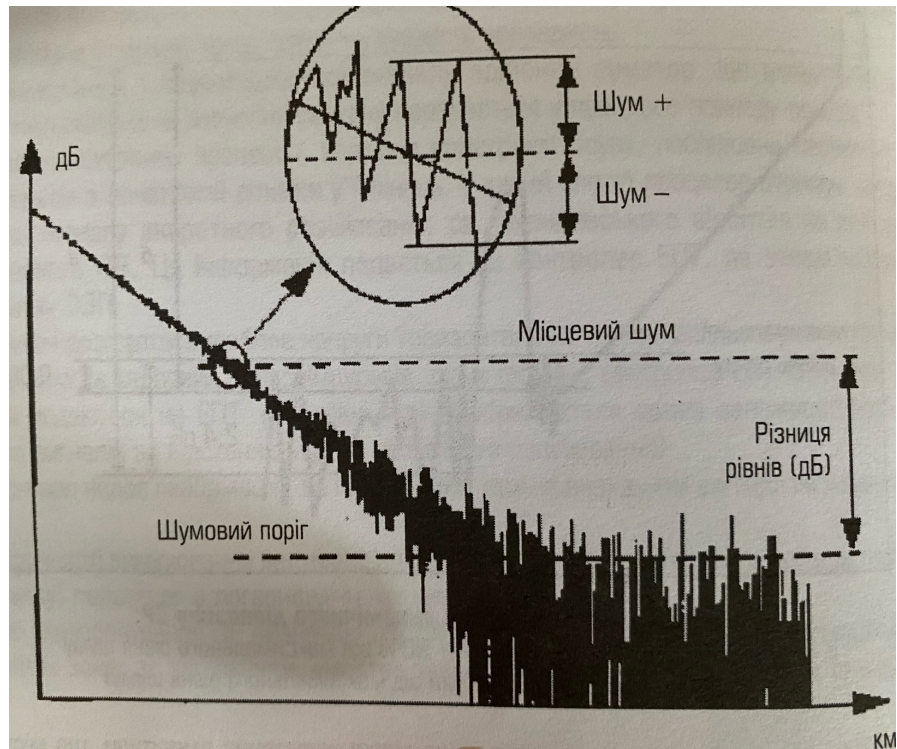


Рис.4.2.2 Залежність рівня шуму від рівня зворотно розсіяного сигналу

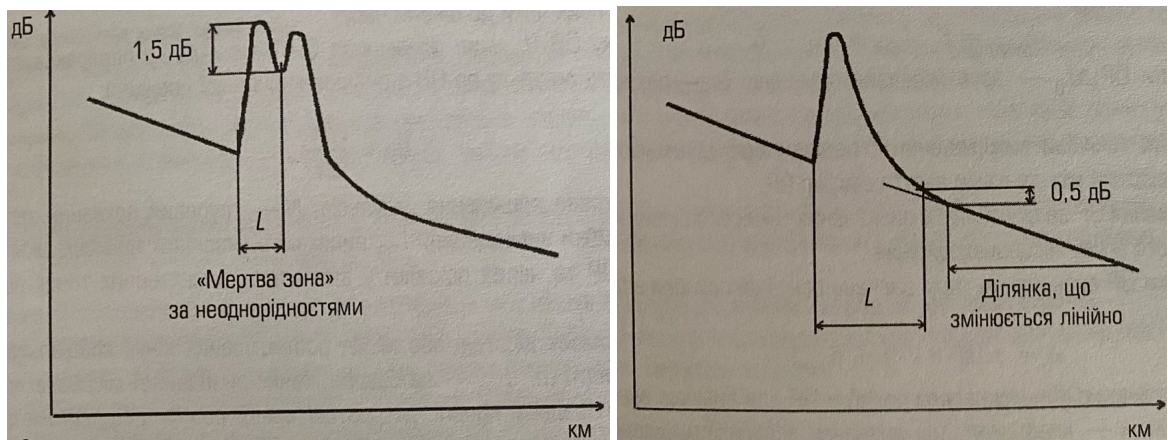
“Мертва зона”

Розрізняють “мертву зону” за неоднорідністю і “мертву зону” за загасанням. Це область рефлектограми, у межах якої не можна визначити стан ОВ, її ще називають зоною відносної нечутливості. “Мертва зона” дозволяє кількісно оцінити відстань, на якій після значного відбиття відбувається втрата інформації, тобто рефлектометр “не бачить” стан ОВ. В той час як Динамічний діапазон визначає далеку точку вимірювань в ОВ, “мертва зона” визначає найближчу точку, а також роздільну здатність, тобто наскільки близько можуть відстояти одна від одної вимірювані неоднорідності.

Параметри “мертвих зон” за загасанням і за відбивальними неоднорідностями, які надають виробники ОР, зазначаються для порівняльного аналізу різних моделей ОР та для оцінювання якості фотоприймального оптичного модуля рефлектометра. Характеристики “мертвих зон” у технічному описі ОР, зазвичай, надаються для мінімальних значень тривалості зондуючого імпульсу та конкретного значення коефіцієнта відбиття від події (що не завжди може відтворити користувач, коли необхідно контролювати цей параметр).

“Мертва зона” за відбивальними неоднорідностями не дає змоги розрізнити дві неоднорідності на рефлектограмі окремо (тобто їх буде видно як одну

відбивальну неоднорідність), представляє собою зону від початку відбитого імпульсу до точки, де сигнал приймача зменшиться до рівня 1,5 дБ нижче від верхньої точки ненасиченого відбиття (рис.4.2.3а). Вважається, що в цій зоні не можна визначити друге розміщене там відбиття.



а б
Рис.4.2.3 Визначення “мертвої зони”:

а- за неоднорідностями, б- за загасанням

“Мертва зона” за загасанням не дає можливості розрізнити на рефлектограмі два загасання як окремі - це зона від початку імпульсу Френелівського відбиття до точки на спадній частині імпульсу, яка лежить на 0,5 дБ вище від лінії екстраполяції зворотного розсіювання (рис. 4.2.3б).

Практичне використання цих параметрів дуже умовне. Як видно з рисунків, в деяких випадках можна визначити друге відбиття й тоді, коли спад між двома відбиваючими неоднорідностями менший ніж 1,5 дБ. У випадку “мертвої зони” за загасанням, якщо вибрана точка на спадній частині відбитого імпульсу на 0,1 дБ вище від рівня, отриманого від екстраполяції зворотного розсіювання, правильно визначити рівень загасання вже практично неможливо.

Динамічний діапазон рефлектометра ОР-2-2

Значення динамічного діапазону вимірювання загасання в дБ при ОСШ=1 та числі усереднень 4096*64 для різних оптичних блоків та тривалостей імпульсів зазначені у таблиці 4.2.2.

Таблиця 4.2.2

	Динамічний діапазон, дБ
--	-------------------------

Тривалість імпульсу, нс		10	30	90	300	1000	3000	10000	20000
ОМ-1,31 мкм – А	без фільтру	20	22,5	25	27,5	30	32,7	35,5	36,5
	з фільтром	20	22,5	25,3	28,7	32,5	36,2	39,5	41,5
ОМ-1,55 мкм – А	без фільтру	18	20,5	23	25,5	28	30,7	33,5	34,5
	з фільтром	18	20,5	23,3	26,7	30,5	34,2	37,5	39,5
ОМ-1,31/1,55 мкм - А	без фільтру	19,5/ 17,5	22/ 20	24,5/ 22,5	27/ 25	29,5/ 27,5	32,2/ 30,2	35/ 33	36/ 34
	з фільтром	19,5/ 17,5	22/ 20	24,8/ 22,8	28,2/ 26,2	32/ 30	35,7/ 33,7	39/ 37	41/ 39

Параметри рефлектометра ОР-2-2

Межі абсолютної похибки, що допускається при вимірюванні згасання становлять не більше $\pm(0,05\alpha)$, дБ, де α - виміряне згасання, дБ.

Мінімальна дискретність відліку при вимірі згасання становить 0,001 дБ.

Величина мертвої зони при вимірюванні згасання становить не більше 14,5 м при тривалості зондувального імпульсу 10 нс і коефіцієнт відображення не більше мінус 40 дБ (при включеному режимі "Висока роздільна здатність").

Величина мертвої зони при виявленні неоднорідностей не більше 3,5 м при тривалості зондувального імпульсу 10 нс і коефіцієнт відображення не більше мінус 40 дБ (при включеному режимі "Висока роздільна здатність").

Рефлектометр забезпечує два основних режими вимірів: із усередненням і без усереднення результатів вимірів. У режимі з усередненням встановлюється кількість усереднень або час вимірювання. У режимі без усереднення вимірювання встановлюється період оновлення рефлектограм.

Багатомодові ОВ підключаються до рефлектометра через оптичний роз'єм типу "ST", а одномодові - через роз'єм типу FC. Можливе встановлення оптичних роз'ємів інших типів

Керування роботою рефлектометра, відображення та зберігання вимірної інформації здійснюється за допомогою ПЕОМ, сумісної з IBM PC, зв'язок з якою здійснюється через послідовний порт RS-232 або USB за допомогою кабелів, що постачаються в комплекті з рефлектометром.

ПЕОМ можна використовувати автономно.

Рефлектометр забезпечує свої технічні характеристики після закінчення часу встановлення робочого режиму, що дорівнює 10 хв.

Рефлектометр зберігає свої технічні характеристики у робочих умовах експлуатації протягом 8 годин безперервної роботи за будь-якого режиму живлення.

Живлення рефлектометра може здійснюватися від:

вбудованої акумуляторної батареї Panasonic VW-VBF2E (12 В, 2 А-год);

від зовнішнього джерела живлення (12 ± 2);

мережі змінного струму з напругою (220 ± 22) і частотою ($50,0\pm 1$) Гц через блок живлення з вихідною напругою 12 В, що входить в комплект поставки.

Час заряду акумулятора при заряді її за допомогою блока живлення, що входить до комплекту поставки, - не менше 10 годин.

Потужність, споживана рефлектометром від мережі змінного струму напругою (220 ± 2) і частотою ($50,0\pm 1$) Гц становить не більше 10 Вт. Струм, що споживається від блока живлення при повністю розрядженій акумуляторній батареї, становить не більше 0,5 А.

Габарити блоків рефлектометра:

базовий блок - 292x250x56 мм; змінний оптичний блок - 109x220x44 мм.

Маса блоків рефлектометра: базовий блок - 5 кг; змінний оптичний блок - 0,9 кг

Рефлектометр складається з базового блоку, змінних оптичних блоків, ПЕОМ типу notebook, джерела живлення та кабелів.

Склад рефлектометра ОР-2-2

Базовий блок (рис.4.2.4) виконаний у прямокутному металевому корпусі настільно-переносного типу фірми Vorla.

У базовому блоці розташовані акумуляторна батарея, імпульсний перетворювач напруги та електронні вузли для керування процесом вимірювання та накопичення інформації, а також змінний оптичний блок. Змінний оптичний блок кріпиться до корпусу базового блоку гвинтом. Для зручності вилучення змінного оптичного блоку на його передній панелі є спеціальний гвинт під кільце-ключ.

Змінний оптичний блок включає оптичний приймальний пристрій, оптичний передавальний пристрій і оптичний розгалужувач, на передній панелі змінного оптичного блоку встановлений оптичний роз'єм для підключення вимірюваного ОВ.



Рис. 4.2.4 Базовий блок

Структурна схема рефлектометра ОР-2-2 наведена на рисунку 4.2.5. Базовий блок рефлектометра містить:

регістр Р для зчитування даних з виходу аналого-цифрового перетворювача та передачі в процесор;

аналого-цифровий перетворювач АЦП для перетворення аналогового сигналу з виходу підсилювача, що узгоджує, в цифрову форму;

узгоджуючий підсилювач УП для узгодження рівнів сигналів оптичного приймального пристрою та АЦП;

пристрій зсуву ПЗ для збільшення просторового розділення рефлектометра шляхом створення додаткового зсуву лазерного імпульсу щодо керуючого сигналу процесора;

формувавч Ф для формування сигналу запуску оптичного передавального пристрою;

оперативний запам'ятовуючий пристрій ОЗП для пам'яті даних рефлектограми;

постійний пристрій ПЗП для зберігання програм;

генератор Г для формування тактових сигналів процесора;

пристрій введення-виведення ПВВ для організації зв'язку процесора за послідовним інтерфейсом з персональною ЕОМ;

процесор, що виробляє сигнали управління блоками Р, ПЗ, ОЗП, ПЗП, ПВВ, зчитує дані з цих блоків та здійснює зв'язок рефлектометра з персональною ЕОМ. Блоки ПЗ, Ф, ОЗП, ПЗП, Г, ПВВ поєднані на платі сигнального процесора ПСП.

Змінний оптичний блок ЗОБ складається з оптичного передавального пристрою ОПдП, оптичного приймального пристрою ОПрП та оптичного розгалужувача ОР.

ОПдП, що містить потужний лазерний діод, призначений для генерації оптичних імпульсів із заданою тривалістю. ОПрП служить для реєстрації та підсилення розсіяного сигналу. ОР служить для введення імпульсів досліджуване ОВ і подачі сигналу зворотного розсіювання на ОПрП.

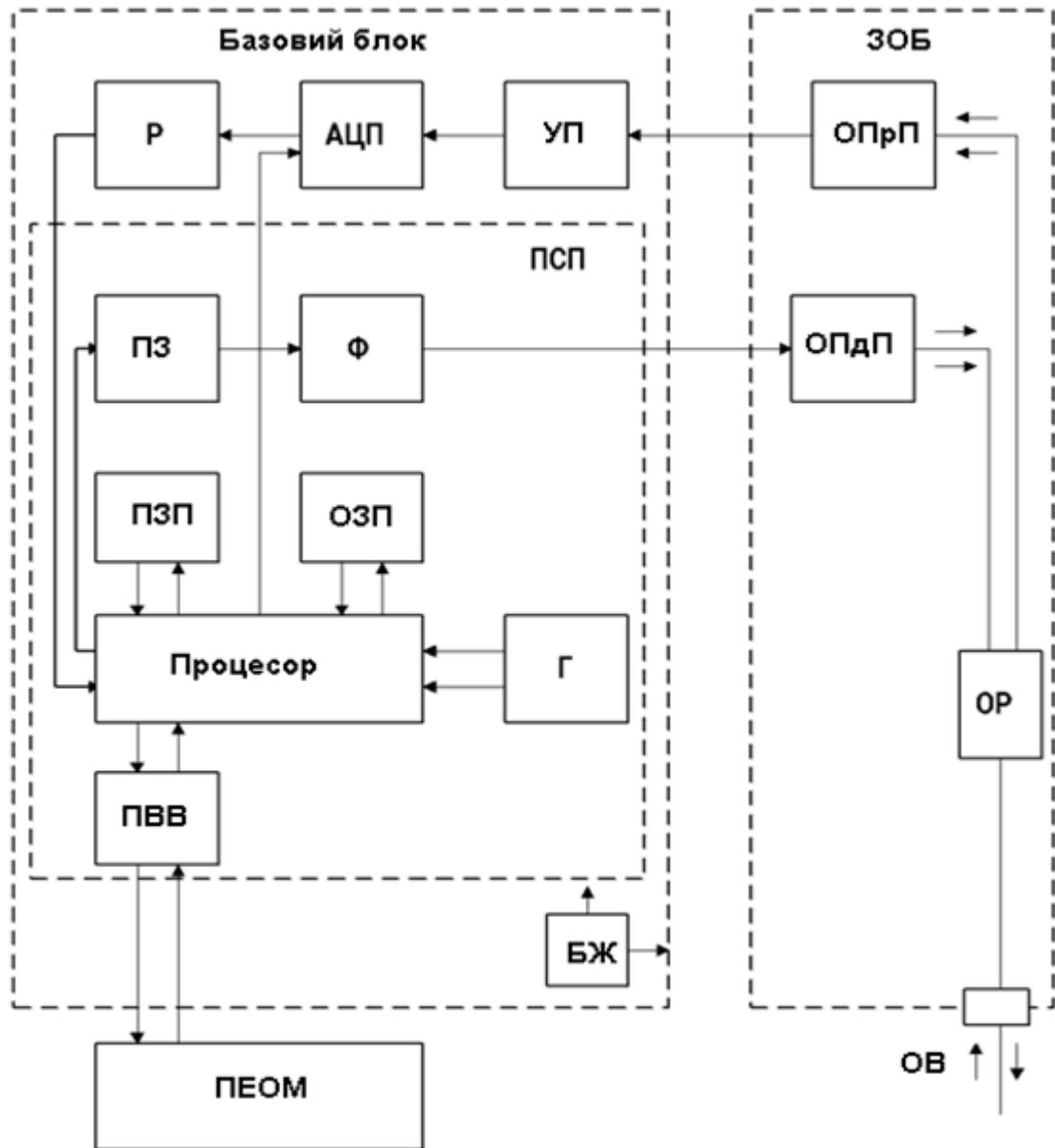


Рис. 4.2.5 Структурна схема рефлектометра:

Р – реєстр; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; УП - підсилювач, що узгоджує; ПСП – плата сигнального процесора; ПЗ - пристрій зсуву; ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій; Ф – формувач імпульсів; ПЗП – постійний пристрій, що запам'ятовує; Г – генератор; ПВВ – пристрій введення-виведення; ЗОБ – змінний оптичний блок; ОПдП – оптичний передавальний пристрій; ОР – оптичний розгалужувач; ОПрП – оптичний приймальний пристрій; ОВ – оптичне волокно; ПЕОМ - персональна ЕОМ; БП – блок живлення

Принцип роботи оптичного рефлектометра

Принцип роботи будь-якого оптичного рефлектометра заснований на вимірюванні сигналу зворотного релеевського розсіювання при проходженні ОВ потужного одиночного оптичного імпульсу. Слабкий сигнал зворотного розсіювання реєструється чутливим оптичним приймачем, перетворюється на цифрову форму і багаторазово усереднюється.

Рефлектометр ОР-2-2 працює в такий спосіб. Відповідно до команд керуючої програми, що знаходиться в оперативній пам'яті ПЕОМ, процесор виробляє код для запуску оптичних імпульсів (за допомогою блоків ПЗ Ф і ОПдП). При проходженні імпульсу ОВ частина його енергії розсіюється назад і надходить на ОПрП, в якому перетворюється в електричну форму і підсилюється. Тривалість сигналу зворотного розсіювання на виході ОПрП дорівнює подвійному часу проходження оптичного сигналу ОВ. Через узгоджуючий підсилювач УП сигнал зворотного розсіювання надходить на вхід АЦП і перетворюється в цифрову форму. Робота АЦП синхронізується процесором. За період запуску оптичних імпульсів АЦП зчитує 16384 відліків вимірюваного сигналу.

Відлік, взятий у момент часу t щодо моменту запуску оптичного імпульсу, відповідає сигналу, розсіяному від точки ОВ, що знаходиться на відстані

$$z = ct/(2n),$$

де c - швидкість світла у вакуумі, n - показник заломлення серцевини ОВ.

Таким чином, за один період запуску оптичного імпульсу вимірюються сигнали, що прийшли від великої кількості точок ОВ.

Кожен відлік, перетворений АЦП в цифрову форму, запам'ятовується оперативним пристроєм пам'яті ОЗП. Для точного виміру сигналу зворотного розсіювання здійснюється багаторазовий запуск оптичного імпульсу. При цьому процесор усереднює відліки, які відповідають однаковим точкам у волокні, що призводить до збільшення відношення сигнал-шум. Після кількох таких циклів отримані значення сигналу з ОЗП передаються ПЕОМ, запам'ятовуються у ній і відображаються на екрані. Потім процес вимірювання, усереднення та очищення регістрів ОЗП повторюється знову. Таким чином, вимірюється, запам'ятовується та відображається вся рефлектограма ОВ. Для збільшення точності та динамічного діапазону вимірювання оператор, що працює з рефлектометром, може збільшити

кількість усереднень, встановивши в режимі вимірювань із усередненням величину $Nav > 1$; ця величина може бути обрана, що дорівнює 1, 2, 4, 8 і т.д. до 1024. При цьому час виміру пропорційно збільшується.

Завантаження ПЗ

Для завантаження програмного забезпечення необхідно запустити на виконання програму reflect.exe. Після цього на екрані з'являється головне вікно та проводиться тестування з'єднання приладу з ПЕОМ (ініціалізація приладу) відповідно до налаштувань програмного забезпечення (рис.4.2.6).

При успішній ініціалізації на екрані з'явиться повідомлення із зазначенням типу та номера підключеного приладу (рис.4.2.6).

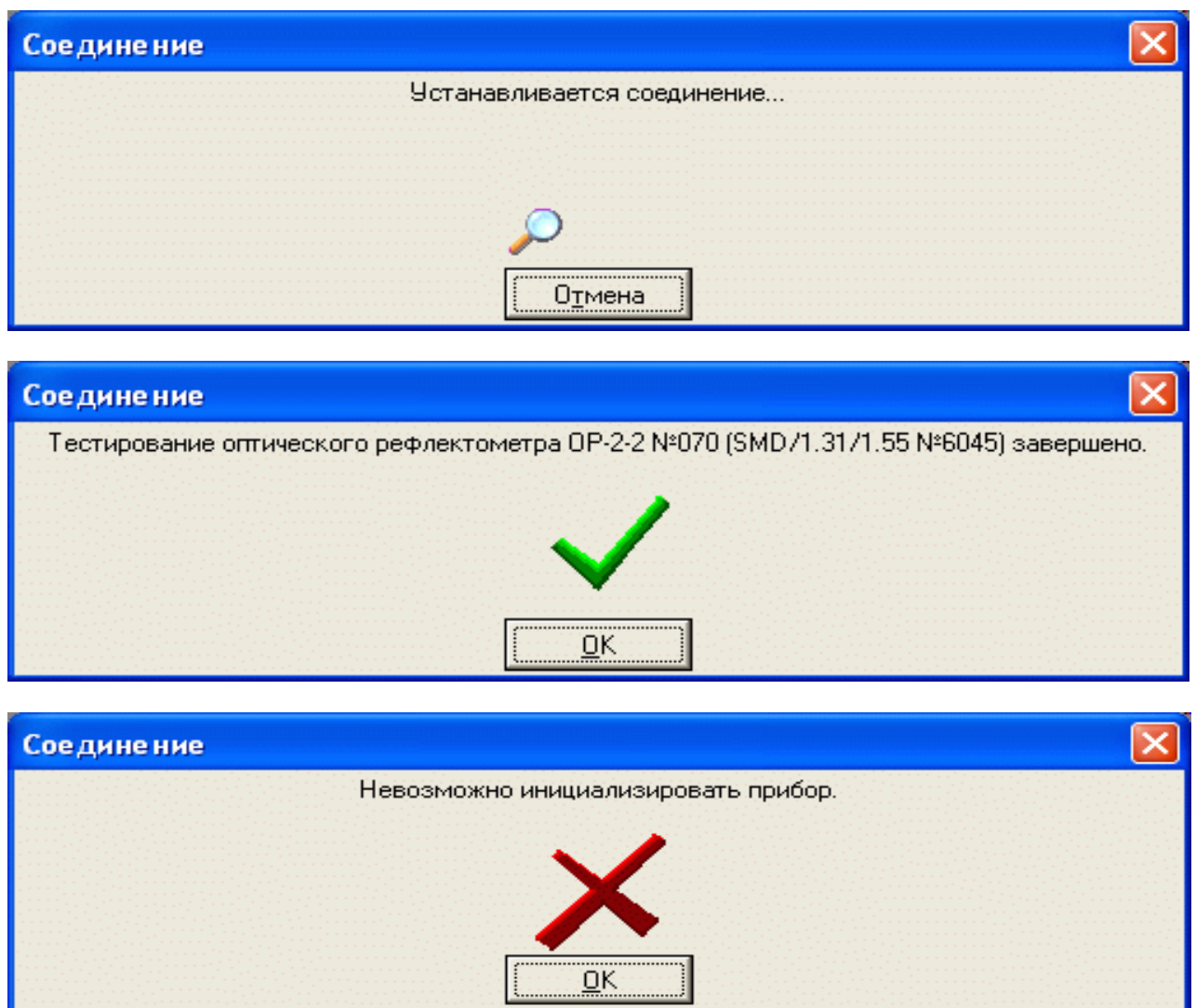


Рис.4.2.6 Процес встановлення з'єднання з OP-2-2

Головне вікно програми

До складу головного вікна програми (рис.4.2.7) входять:

- рядок заголовка;
- рядок меню;
- панель кнопок;
- інформаційна панель у лівій частині вікна, яка з'являється під час проведення вимірювань або відкриття вікна з рефлектограмою;
- робоча область, у якій розташовуються вікна з рефлектограмами.

Кожна рефлектограма під час вимірювання (відкриття) відображається в окремому вікні. Перехід від одного вікна до іншого здійснюється так:

- клацанням "миші" по вікну;
- вибором вікна зі списку підменю Вікно;
- натисканням клавіш CTRL+F6 або CTRL+TAB (перехід до попереднього вікна) та CTRL+SHIFT+F6 або CTRL+SHIFT+TAB (перехід до наступного вікна).

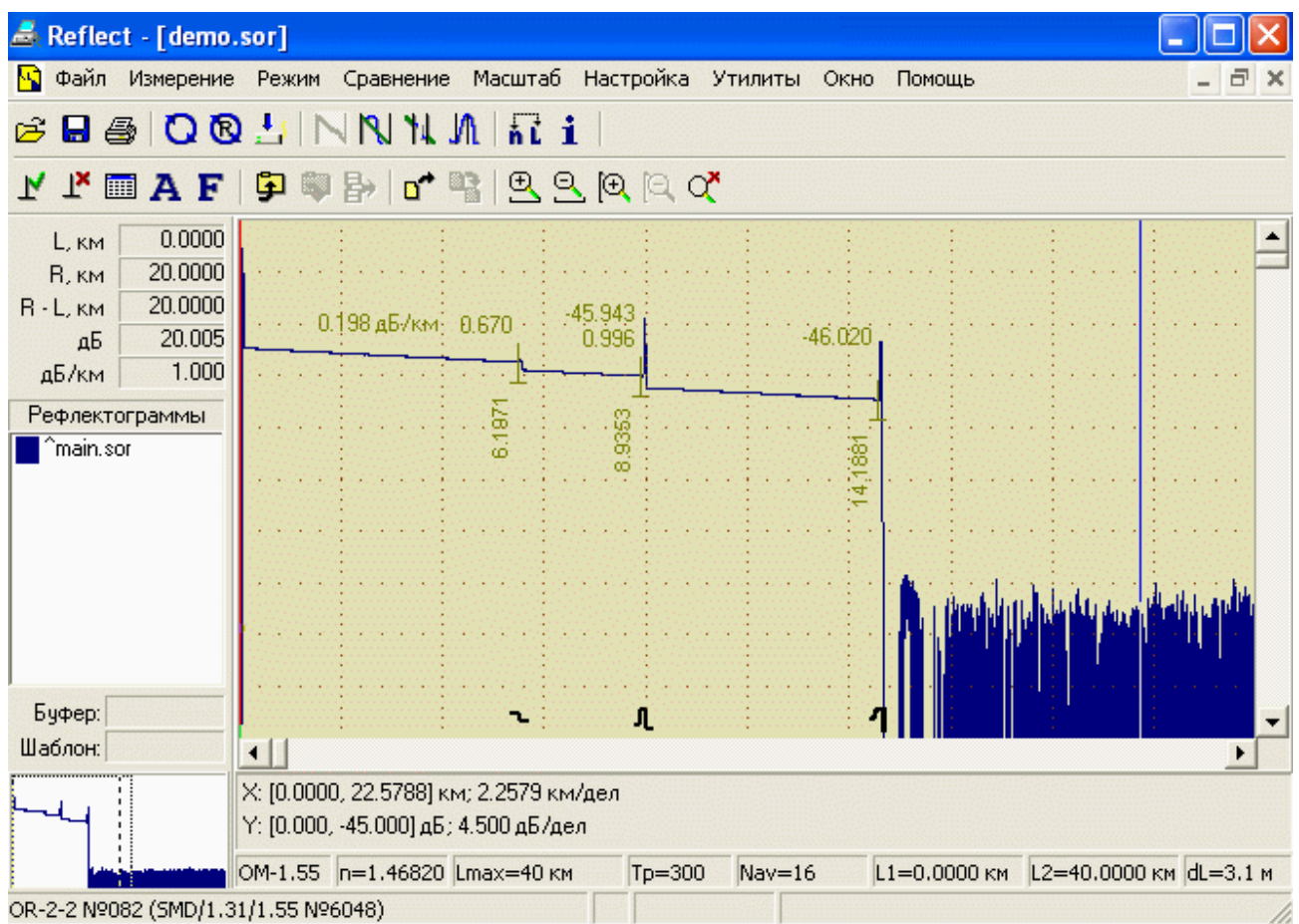
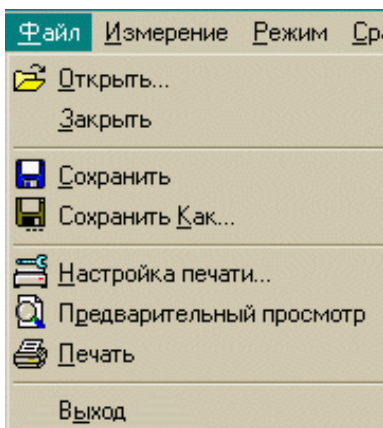
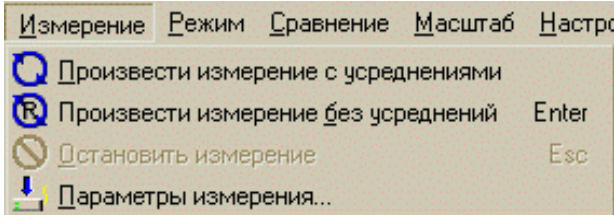


Рис. 4.2.7 Головне вікно програми

Підменю "файл"

<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> відкриття раніше збереженої рефлектограми;<input type="checkbox"/> закриття поточного вікна із рефлектограмою;<input type="checkbox"/> збереження у файл поточної рефлектограми<input type="checkbox"/> збереження поточної рефлектограми у файл з іншим ім'ям;<input type="checkbox"/> налаштування параметрів друку;<input type="checkbox"/> попередній перегляд перед друком поточної рефлектограми;<input type="checkbox"/> друк поточної рефлектограми<input type="checkbox"/> вихід із програми.	
--	---

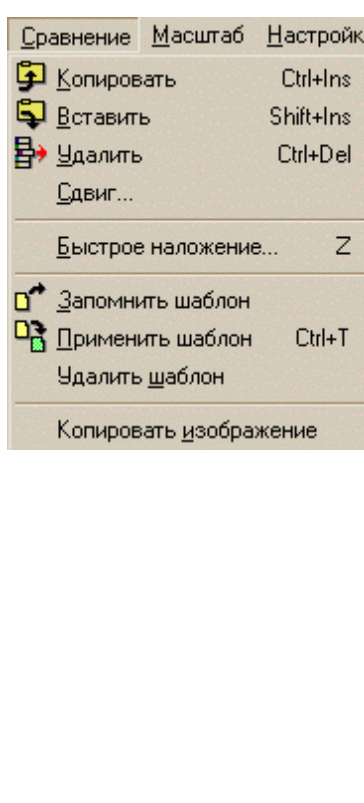
Підменю "Вимірювання"

<ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> запуск процесу вимірювання із усередненням;<input type="checkbox"/> запуск процесу вимірювання без усереднення;<input type="checkbox"/> дострокова зупинка процесу вимірювання;<input type="checkbox"/> встановлення початкових параметрів вимірювання	
--	--

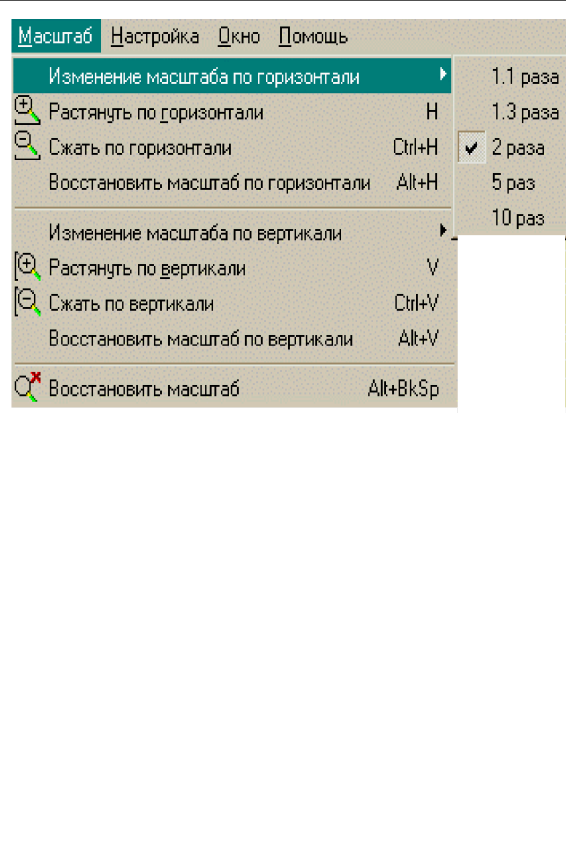
Підменю "Режим"

- вимірювання згасання по двох точках;
- вимірювання згасання при апроксимації рефлектограми прямою лінією;
- вимірювання згасання у поєднанні ОВ;
- вимір коефіцієнта відображення;
- вимір ORL;
- коригування показника заломлення ОВ;
- коригування коефіцієнта зворотного розсіювання;
- інформація про рефлектограму;
- фіксація позначки, що відповідає поточному режиму та положенню маркерів;
- видалення всіх позначок між маркерами;
- виклик таблиці із відмітками поточної рефлектограми;
- автоматичний аналіз рефлектограм;
- граничні значення автоматичного аналізу рефлектограми;
- фільтрація виміряної рефлектограми

Режим	Сравнение	Масштаб	Настройка	Утил
	Измерение затухания по двум точкам			P
	Измерение затухания с аппроксимацией			D
	Затухание в соединении ОВ			S
	Коефициент отражения			R
	ORL			O
	Показатель преломления...			N
	Коефициент обратного рассеяния...			B
	Информация о рефлекторгамме...			I
	Зафиксировать			Ctrl+Enter
	Удалить отметки			Alt+Del
	Таблица отметок...			T
	Автомат			A
	Пороговые значения...			
	Фильтр			F

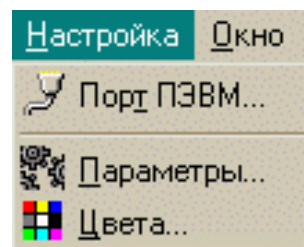
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> копіювання поточної рефлектограми у буфер; <input type="checkbox"/> накладання рефлектограми з буфера на поточну; <input type="checkbox"/> видалення зазначеної накладеної рефлектограми; <input type="checkbox"/> зсув накладеної рефлектограми по вертикалі; <input type="checkbox"/> швидке накладання рефлектограм; <input type="checkbox"/> запам'ятовування положення відміток поточної рефлектограми як шаблон; <input type="checkbox"/> застосування шаблону до поточної рефлектограми; <input type="checkbox"/> видалення шаблону; <input type="checkbox"/> копіювати зображення рефлектограми в буфер обміну ПЕОМ 	
--	---

Підменю “Масштаб”

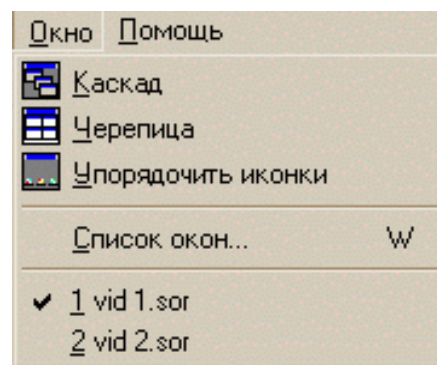
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Вибір рядка підменю дозволяє: <input type="checkbox"/> встановити коефіцієнт зміни масштабу по горизонталі; <input type="checkbox"/> збільшити масштаб (розтягнути рефлектограму) по горизонталі відповідно до обраного коефіцієнта; <input type="checkbox"/> зменшити масштаб (стиснути рефлектограму) по горизонталі відповідно до обраного коефіцієнта; <input type="checkbox"/> відновити вихідний масштаб рефлектограми по горизонталі; <input type="checkbox"/> встановити коефіцієнт зміни масштабу за вертикаллю; 	
---	--

<input type="checkbox"/> збільшити масштаб (розтягнути рефлектограму) по вертикалі відповідно до обраного коефіцієнта; <input type="checkbox"/> зменшити масштаб (стиснути рефлектограму) по вертикалі відповідно до обраного коефіцієнта; <input type="checkbox"/> відновити вихідний масштаб рефлектограми за вертикаллю; <input type="checkbox"/> відновити вихідний масштаб рефлектограми по обох осях	
---	--

Підменю “Налаштування”

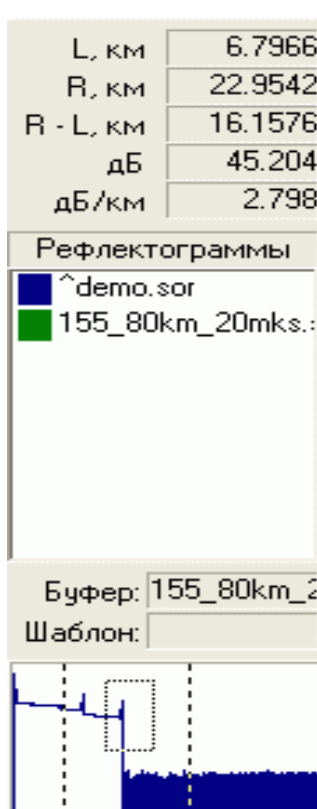
<input type="checkbox"/> вибір порту ПЕОМ, якого підключений рефлектометр; <input type="checkbox"/> вибір параметрів програми <input type="checkbox"/> налаштування кольорової гами елементів рефлектограми	
---	--

Підменю “Вікно”

<input type="checkbox"/> вибудовування вікон із рефлектограмами каскадом; <input type="checkbox"/> вибудовування вікон із рефлектограмами черепицею; <input type="checkbox"/> упорядкування мінімізованих вікон; <input type="checkbox"/> список відкритих вікон в алфавітному	
---	---

<p>порядку за іменами файлів</p> <p><input type="checkbox"/> список відкритих вікон із позначкою активного вікна</p>	
--	--

Інформаційна панель

<p><input type="checkbox"/> Інформаційна панель з'являється у лівій частині головного вікна при вимірі чи відкритті рефлектограми. Інформаційна панель містить такі дані, що стосуються поточної рефлектограми (поточного вікна):</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> становище лівого маркера (L, км); <input type="checkbox"/> становище правого маркера (R, км); <input type="checkbox"/> відстань між маркерами (R-L, км); <input type="checkbox"/> згасання між маркерами (дБ); <input type="checkbox"/> коефіцієнт загасання (дБ/км) <input type="checkbox"/> список рефлектограм (основний та накладених) у поточному вікні із зазначенням відповідних їм кольорів <input type="checkbox"/> Зміст цих рядків залежить від вибраного режиму вимірювання <input type="checkbox"/> ім'я файлу, що у буфері; <input type="checkbox"/> ім'я файлу, що використовується як шаблон; <input type="checkbox"/> "оглядове" вікно, в яке виведено поточну рефлектограму; частина рефлектограми, видима на екрані після зміни масштабу, поміщена в точковий прямокутник; маркери відображені пунктирними лініями 	 <p>The screenshot shows a software interface with a data table at the top and a plot below. The table contains the following values:</p> <table border="1"> <tr><td>L, км</td><td>6.7966</td></tr> <tr><td>R, км</td><td>22.9542</td></tr> <tr><td>R - L, км</td><td>16.1576</td></tr> <tr><td>дБ</td><td>45.204</td></tr> <tr><td>дБ/км</td><td>2.798</td></tr> </table> <p>Below the table is a section titled "Рефлектограммы" (Reflectograms) with a list of files: a blue square for "^demo.sor" and a green square for "155_80km_20mks.". Below this is a plot area with a blue line graph. The plot has a dashed box around a specific section of the signal. Labels "Буфер: 155_80km_2" and "Шаблон:" are visible above the plot.</p>	L, км	6.7966	R, км	22.9542	R - L, км	16.1576	дБ	45.204	дБ/км	2.798
L, км	6.7966										
R, км	22.9542										
R - L, км	16.1576										
дБ	45.204										
дБ/км	2.798										

Вибір параметрів вимірювання

Перед розглядом особливостей вибору параметрів вимірювання на ОР-2-2, зазначимо основні міркування для вибору параметрів вимірювання для всіх рефлектометрів. Вибір параметрів вимірювання є дуже важливою частиною проведення вимірювань. В залежності від обраних параметрів вимірювання на рефлектограмі будуть чи не будуть з'являтися певні неоднорідності, і також кінцеві результати вимірювань будуть вірними чи ні.

Вибір довжини хвилі при вимірюваннях впливає на відображення на рефлектограмі втрат сигналу в ОВ.

Чутливість волокна до мікровигинів обернено пропорційна до показника заломлення його серцевини, який у свою чергу залежить від довжини хвилі. Згідно з цією закономірністю, вигин ОМ ОВ призводить до зміни показника заломлення. Тому, щоб визначити втрати, зумовлені вигинами, потрібно чітко чергувати довжини хвиль при проведенні вимірювань.

Зазвичай, вимірювання на довжині хвилі 1550 нм дозволяє:

- виявляти дефекти, викликані деформацією ОК під час прокладання (втрати від надмірних вигинів, загасання від натягів ОВ);
- з меншим рівнем шумів спостерігати віддалені ділянки траси, що вимірюється;
- визначити якість лінії, яка передає сигнали на довжині хвилі 1550 нм.

Вимірювання на довжині хвилі 1310 нм дозволяє визначити:

- розташування мікровигинів та якість безпосередньо зварених з'єднань;
- якість лінії, яка передає сигнали на довжині хвилі 1310 нм.

Наступний параметр, який обирається для проведення вимірювань - *тривалість зонduючого імпульсу*. Тривалість імпульсу впливає на величину динамічного діапазону. Чим більше тривалість імпульсу, тим більше енергії вводиться до ОВ і тим більше рівень сигналу Релеєвського розсіювання. Це у свою чергу призводить до зменшення роздільної здатності за неоднорідностями та збільшення “мертвої зони” ОР. Відповідно зменшення тривалості імпульсу дає збільшення роздільної здатності за неоднорідностями та зменшення “мертвої

зони” ОР, що призводить до підвищення виявляючої чутливості ОР, але зменшує динамічний діапазон.

Кількість потужності оптичного сигналу, що повертається на вхід ОР з ОВ, пропорційна до зворотного розсіювання волокна, пікової потужності рефлектометра та тривалості зондуючого імпульсу (рис. 4.2.8).

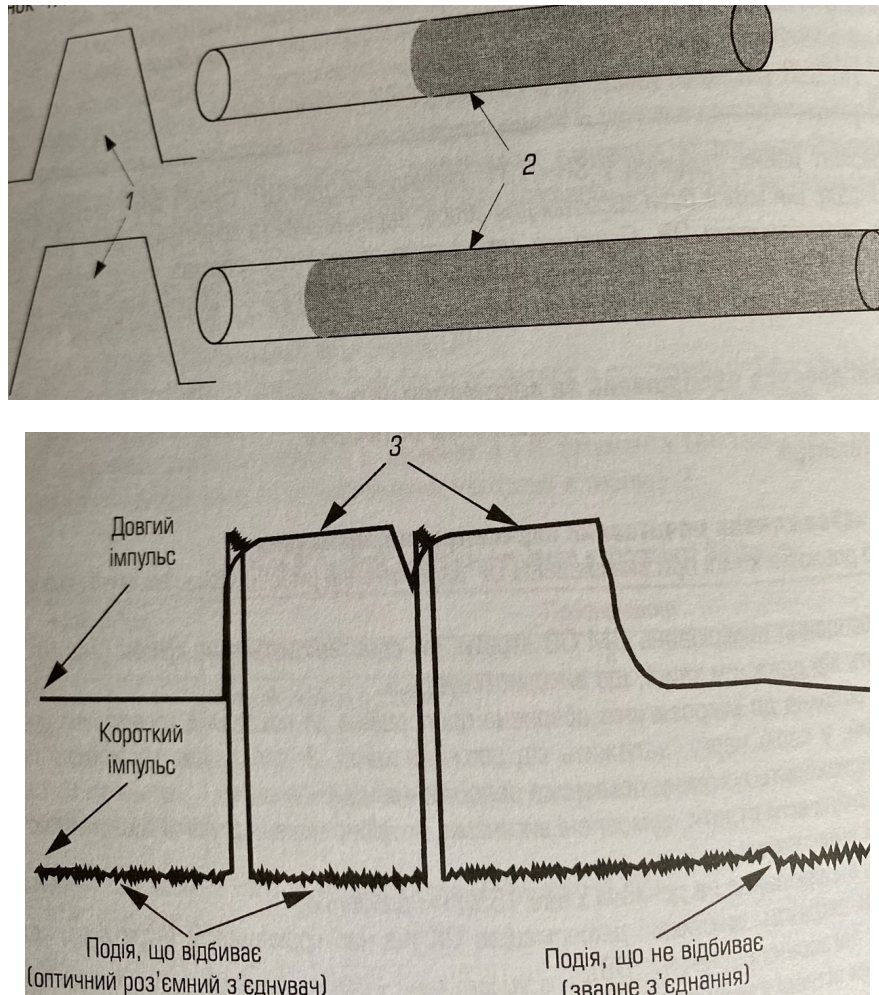


Рис.4.2.8 Відображення на рефлектограмі відповіді ОВ на зондуючі імпульси різної тривалості. 1- зондуючі імпульси, 2- кількість оптичного сигналу, введеного до ОВ, 3- відображення на рефлектограмі подій для різної тривалості імпульсу

Для збільшення потужності зворотно розсіяного сигналу та підвищення точності результатів вимірювання за загасанням необхідно збільшувати тривалість зондуючого імпульсу, що подається на вхід ОР.

Вибір часу усереднення вимірювань визначається довжиною ділянки ОК, що вимірюється при фіксованій тривалості зондуючого імпульсу. У загальному випадку збільшення часу усереднення сигналу у 16 разів дозволяє розширити

динамічний діапазон на 3 дБ, але це потребує часу вимірювань. На практиці, для отримання якісної рефлектограми для траси 100 км час усереднення обирається приблизно 2-5 хвилин.

Обраний діапазон вимірювань в км повинен за можливістю перевищувати реальну довжину вимірюваного ОК на одну третину, інакше зростає ймовірність виникнення “фантомів” (неіснуючих неоднорідностей).

Значення групового показника заломлення встановлюється згідно технічних даних на ОК, наданих виробником. Якщо виробник ОК заздалегідь не зазначив коефіцієнт групового показника заломлення, його встановлюють для даного типу ОВ, використовуюваного в ОК. При цьому необхідно зважати на те, що похибка в 1% при встановленні групового показника заломлення призведе до похибки в 0,1% при визначенні відстані. Для великих відстаней ця помилка може бути доволі суттєвою (наприклад, похибка під час вимірювань події на відстані 30 км становитиме 30 м) і переважати інші складові, які роблять внесок у загальну похибку визначення відстані.

Встановлення параметрів вимірювання в ОР-2-2

Перед початком процесу вимірювання слід встановити його параметри. Для цього потрібно вибрати пункт меню Вимірювання → Установки або натиснути кнопку на панелі кнопок. Після цього на екрані з'явиться вікно, де необхідно встановити чисельні значення відповідних параметрів (рис.4.2.9).

Тип ОВ – довжина хвилі – вказується тип змінного оптичного блоку (ЗОБ), встановленого в рефлектометрі. Визначення типу блоку проводиться програмою при ініціалізації рефлектометра і відображається автоматично, при цьому для ЗОБ БМ-0.85 мкм, БМ-1.31 мкм, ОМ-1.31 мкм і ОМ-1.55 мкм цей рядок недоступний. Якщо встановлено ЗОБ на дві довжини хвилі, то відображається SMD-1.31 або SMD-1.55 для ОМ ЗОБ і MMD-0.85 або MMD-1.31 для БМ ЗОБ, і оператор вибирає в цьому рядку довжину хвилі.

Коефіцієнт зворотного розсіювання - частка потужності оптичного імпульсу в дБ, що розсіюється в ОВ і поширюється на його початок. У програмному забезпеченні, яке постачається користувачеві, встановлені такі значення:

- мінус 81 дБ для ОМ ОВ та довжини хвилі 1,55 мкм;

- мінус 80 дБ для ОМ ОВ та довжини хвилі 1,31 мкм;
- мінус 75 дБ для БМ ОВ та довжини хвилі 1,31 мкм;
- мінус 72 дБ для БМ ОВ та довжини хвилі 0,85 мкм.

Коефіцієнт зворотного розсіювання можна змінювати з кроком 0,1 дБ

Показник заломлення ОВ – n – значення показника заломлення ОВ; змінюється із кроком 0,00001; у програмному забезпеченні, що постачається користувачеві, встановлені такі значення

- 1,4682 для ОМ ОВ та довжини хвилі 1,55 мкм;
- 1,4675 для ОМ ОВ та довжини хвилі 1,31 мкм;
- 1,486 для БМ ОВ та довжини хвилі 1,31 мкм;
- 1,490 для БМ ОВ та довжини хвилі 0,85 мкм.

Параметры измерения

Тип ОВ - длина волны: SMD1.31

Коэффициент обратного рассеяния - ВС: -80.0 дБ

Показатель преломления ОВ - n: 1.47500

Диапазон расстояний - Lmax: 40 км

Начало участка - L1: 0.0000 км

Конец участка - L2: 40.0000 км

Разрешение - dL: 3.0 м

Длительность зондирующего импульса - Tr: 30 нс

Измерение с усреднениями

Число усреднений рефлектограммы - 4096*Nav: 7

Длительность измерения (мин:сек): 00:15

Измерение без усреднений

Период обновления рефлектограммы: 0.5 сек

Пороговые значения

Затухание в соединении - LT: 0.100 дБ

Коэффициент отражения - RT: -50.000 дБ

Конец ОВ - ET: 6.000 дБ

Коэффициент затухания - ST: 0.400 дБ/км

Высокое разрешение

Уменьшенная мощность лазера

OK Отмена

Рис. 4.2.9 Встановлення параметрів вимірювання

Діапазон відстаней - L_{max} – максимальне значення довжини вимірюваних відстаней може приймати значення: 2, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160 і 240 км. Встановлюється оператором. Значення L_{max} має перевищувати можливу довжину вимірюваної лінії. Параметр L_{max} визначає період запуску зондувальних імпульсів, який повинен бути більшим, ніж подвійний час проходження оптичного імпульсу ОВ.

Початок ділянки - $L1$ - відстань від початку ОВ до початку вимірюваної ділянки; може набувати будь-які значення в межах від 0 до L_{max} .

Кінець ділянки - $L2$ - відстань від початку ВВ до кінця вимірюваної ділянки; може приймати будь-які значення від $L1$ до L_{max} .

Роздільна здатність – dL – відстань між двома відліками (інтервал дискретизації) рефлектометра.

Тривалість зондувального імпульсу - T_r - значення тривалості зондувального імпульсу; може набувати значень 10, 30, 90, 300, 1000, 3000, 10000, 20000 нс. Діапазон допустимих значень тривалості оптичних імпульсів залежить від вибраного значення L_{max} і автоматично обмежується програмою, що управляє.

Вимірювання із усередненням

Число усереднень рефлектограми $4096 * N_{av}$ – визначає загальну кількість усереднень рефлектограми у пам'яті ПЕОМ як роботи з усередненням. Значення N_{av} може приймати значення 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024.

Тривалість вимірів (мін; сек) – задає тривалість процесу вимірів із усередненням.

Якщо в режимі вимірювань із усередненням оператор задає число усереднень рефлектограми, то при цьому автоматично висвічується приблизна тривалість процесу вимірювань, якщо оператор задає тривалість процесу вимірювань, то автоматично визначається, якій кількості усереднень рефлектограми це відповідає.

Вимірювання без усереднень.

Період оновлення рефлектограм – визначає період оновлення відображення рефлектограм на екрані при вимірюваннях в режимі реального часу; набуває значення 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 сек.

Порогові значення для автоматичного аналізу рефлектограми

Загасання у з'єднанні LT – граничне значення загасання в неоднорідності, дБ; неоднорідності, згасання в яких перевищує задане граничне значення, відображаються в таблиці позначок при автоматичному аналізі рефлектограми. У програмному забезпеченні, яке постачається користувачеві, встановлено значення 0,1 дБ для одномодових змінних оптичних блоків та значення 0,2 дБ для багатомодових змінних оптичних блоків.

Коефіцієнт відбиття – RT – порогове значення коефіцієнта відбиття, дБ; неоднорідності з коефіцієнтом відбиття вище цього порогового значення відображаються в таблиці відміток при автоматичному аналізі рефлектограми; у програмному забезпеченні, яке постачається користувачеві, встановлено значення мінус 50 дБ.

Кінець ОВ – ET – граничне значення загасання, дБ, визначення кінця ОВ; перша неоднорідність із загасанням, що перевищує граничне значення, визначається при автоматичному аналізі рефлектограми як кінець ОВ, всі наступні неоднорідності ігноруються; у програмному забезпеченні, що постачається користувачеві, встановлено значення 6 дБ.

Коефіцієнт загасання – ST – граничне значення коефіцієнта загасання ділянки, дБ/км; перевищення порогового значення коефіцієнта загасання відзначається зірочкою у таблиці відміток; у програмному забезпеченні, що постачається користувачеві, встановлено значення:

- 0,25 дБ/км для ОМ ОВ та довжини хвилі 1,55 мкм;
- 0,4 дБ/км для ОМ ОВ та довжини хвилі 1,31 мкм;
- 1,0 дБ/км для БМ ОВ та довжини хвилі 1,31 мкм;
- 3,0 дБ/км для БМ ОВ та довжини хвилі 0,85 мкм.

Висока роздільна здатність - в цьому режимі збільшена смуга пропускання оптичного приймача, що дає можливість зменшити мертву зону і краще розрізняти

неоднорідності, що близько лежать. Однак у цьому режимі збільшуються шуми оптичного приймача.

Зменшена потужність лазера - включається режим виміру рефлектограми із зменшеною потужністю випромінювання лазера. Такий режим доцільний для вимірювання великих коефіцієнтів відбиття від неоднорідностей.

Значення параметрів вимірювань, що встановлюються оператором, залежать від передбачуваних параметрів ОВ (лінії): довжини та середнього загасання. При вимірі цих характеристик за допомогою оптичного рефлектометра гранична величина вимірюваного повного згасання збільшується пропорційно тривалості оптичного імпульсу (і відповідно його енергії), але одночасно погіршується просторова роздільна здатність рефлектометра. Наприклад, тривалості імпульсу $T_p = 300$ нс відповідає величина просторової роздільної здатності $LP \approx 30$ м. Це означає, що практично неможливо розрізнити дві неоднорідності, які не відбивають (типу зварного з'єднання ОВ), відстань між якими менше LP . З іншого боку, підвищити динамічний діапазон рефлектометра можна за рахунок збільшення кількості усереднень, що задається параметром Nav (на 0,75 дБ при збільшенні Nav в два рази), але при цьому зростає час вимірювання.

Величина L_{max} , що встановлюється перед початком вимірювання, повинна перевищувати довжину лінії вимірювання. Якщо довжина лінії близька до будь-якого значення L_{max} (перевищує $2/3 \cdot L_{max}$), то наявність у сигналі зворотного розсіювання потужного імпульсу, відбитого від далекого кінця ОВ, може призводити до невеликих спотворень загасання дальніх ділянок лінії або появи на гладкій ділянці рефлектограми хибних відбитих імпульсів. Щоб уникнути цього, рекомендується вибирати значення L_{max} не менше подвоєної довжини лінії.

Вимірювання за допомогою оптичного рефлектометра

Візуальний контроль та аналіз отриманої рефлектограми загального стану ОВ є непростим завданням, що потребує від оператора певних знань і навичок, оскільки не всі параметри ОВ, що вимірюються, можна визначати за допомогою ОР в автоматичному режимі. У деяких випадках автоматичний режим вимірювань

не тільки не забезпечує визначення необхідних параметрів характерних подій, а й іноді навіть не дає змоги ідентифікувати їх.

Загальний вигляд рефлектограми зворотного розсіяння та можливі характерні події показані на рис. 4.2.7.

Характерні події, що можна визначити на рефлектограмі (зліва - направо рис.4.2.7):

- перший різкий викид вгору є відбиттям від оптичного роз'єму на вході ОР - це відбиваюча неоднорідність;
- невелике падіння рівня потужності зворотно розсіяного сигналу обумовлено втратами у невідбиваючій неоднорідності, наприклад, у зварюванні (вигини також є невідбиваючими неоднорідностями і відображаються подібним падінням сигналу);
- знову різкий викид вгору показує відбиття оптичного сигналу від відбиваючої неоднорідності, в якості якої може бути оптичний роз'єм, механічний сплайс або мікротріщина;
- останній різкий викид вгору - відбиваюча неоднорідність, що показує відбиття від кінця ОВ, після чого розсіяний сигнал падає і спостерігаємо шумовий сигнал.

За рефлектограмою зворотного розсіяння можна виміряти:

- довжину лінії,
- відстань від початку лінії до конкретної неоднорідності,
- загасання у всій лінії, між двома будь-якими точками, загасання відбиваючої неоднорідності,
- коефіцієнт загасання, іншими словами, кілометричне загасання всієї лінії, між двома точками, двоточковим методом або методом найменших квадратів (LSA),
- загасання у зварюванні за допомогою п'яти маркерів,
- коефіцієнт відбиття відбиваючої неоднорідності:

$$R = 10 \lg (P_{\text{від}}/P_c),$$

де $P_{\text{від}}$ - рівень потужності відбитого сигналу, P_c - рівень потужності сигналу, що проходить через відбивальну неоднорідність,

- ORL (Optical Return Loss) - зворотні втрати:

$$ORL = 10 \lg (P_{\text{вх}}/P_{\Sigma}),$$

де $P_{\text{вх}}$ - рівень потужності сигналу на вході ОР, тобто що вводиться в ОВ, P_{Σ} - сумарна відбита потужність у визначеній точці рефлектограми.

Точність визначення місця події (неоднорідності) на рефлектограмі

На точність вимірювання відстані до події (неоднорідності) ОР поряд з інструментальною похибкою пристрою впливають наявність скрутки волокна в конструкції ОК та помилковий показник заломлення в ОВ. При пошуку пошкоджень за результатами вимірювань ОР необхідно враховувати також наявність запасу для укладання та монтажу ОК.

Похибка визначення відстані рефлектометром залежить, передусім, від типу ОР. Її межі обчислюються за даними паспорта на ОР.

Компенсувати наявність скрутки можна, змінюючи встановлений на ОР показник заломлення під час вимірювання відстані до події. Необхідність такої компенсації пояснюється найбільшим впливом скрутки волокна в ОК на точність визначення відстані до події (у деяких типах ОК скрутка перевищує 3% від довжини кабелю), що може особливо даватися взнаки на довгих регенераційних ділянках.

Похибка, внесена при вимірюванні відстані до події через відхилення встановленого на ОР показника заломлення від показника заломлення, з яким було виміряно ОК, арифметично додається до похибок на попередніх ділянках, що виникли з цієї самої причини і мають скінчений числовий вираз. Наступний приклад конкретної рефлектограми доволі довгої регенераційної ділянки ілюструє присутність похибки.

Для того, щоб визначити, наскільки довжина ОК (відстань до події) менша, ніж довжина ОВ в кабелі (яку відображає ОР), необхідно обчислити коефіцієнт скрутки волокна в кабелі або за геометричними розмірами кабелю, або за відомими будівельними довжинами ділянок.

За геометричними розмірами коефіцієнт скрутки волокна в кабелі (додаткова довжина волокна в ОК, зумовлена наявністю скрутки):

$$Z = (Z'/S),$$

де Z' - довжина ОВ на один крок скрутки, S - крок скрутки.

Звідси можна визначити коефіцієнт скрутки у відсотках:

$$Z = [\sqrt{(1 + (2\pi r/S)^2)} - 1] \cdot 100\%,$$

де r - радіус скрутки.

Довжину ОВ на один крок скрутки можна визначити (рис. 4.2.10)

$$Z' = \sqrt{S^2 + 4\pi r^2}$$

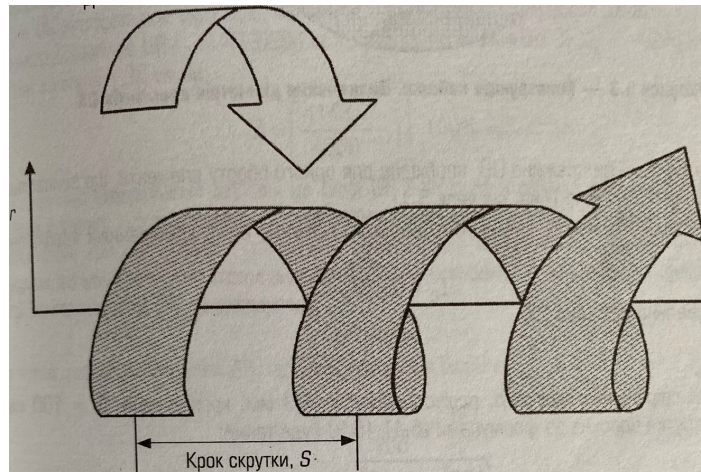


Рис. 4.2.10 Довжина ОВ в кабелі на один крок скрутки

Радіус скрутки (рис.4.2.11) - відстань між віссю кабелю і серединою елемента, що зивається, обчислюють як

$$r = D_C/2 + D_M/2,$$

де D_C - діаметр силового елемента ОК, D_M - діаметр модуля ОК (модуль - елемент конструкції ОК, куди укладається ОВ).



Рис.4.2.11 Визначення радіуса скрутки ОВ

Крок скрутки S - це довжина ОВ, необхідна для одного оберту елемента, що зивається, на 360° навколо осі кабелю (рис. 4.2.10)

У разі необхідності можна визначити фактичну довжину ОВ з урахуванням коефіцієнта скрутки:

$$L_C = L_B \cdot Z,$$

де L_B - будівельна довжина ОК.

Для ілюстрації впливу скрутки на визначення відстані на рефлектограмі зворотного розсіяння нижче наведено приклад.

Для ОК зі спіральною скруткою, показником заломлення ОВ $n_B=1,4580$, коефіцієнтом скрутки волокна $Z=3,585\%$ скоригований показник заломлення наступний:

$$n_C = 1,485 \cdot (3,585/100 + 1) = 1,51027$$

Щоб забезпечити необхідну компенсацію наявності скрутки волокна в кабелі, при вимірюванні відстані до події на рефлектометрі встановлюють скоригований показник заломлення ОВ $n_C=1,51027$. Під час вимірювання з такими показниками оптичний рефлектометр виміряє оптичну довжину волокна в ОК до події (неоднорідності). Похибка, яка вноситься на кожній ділянці, що передують події, становитиме $+3,585\%$. Ці похибки арифметично додаються до похибки, яка вноситься на ділянці з розглянутою подією та становить $+3,585\%$.

На рис. 4.2.12 наведено рефлектограму подій на ОК, довжина якого перевищує 88 км, коли показник заломлення серцевини ОВ $n_B=1,4580$, тобто без врахування скрутки. При автоматичній обробці подій, наприклад, для події (зварного з'єднання) на відстані 47,9384 км отримано загасання 0,109 дБ.

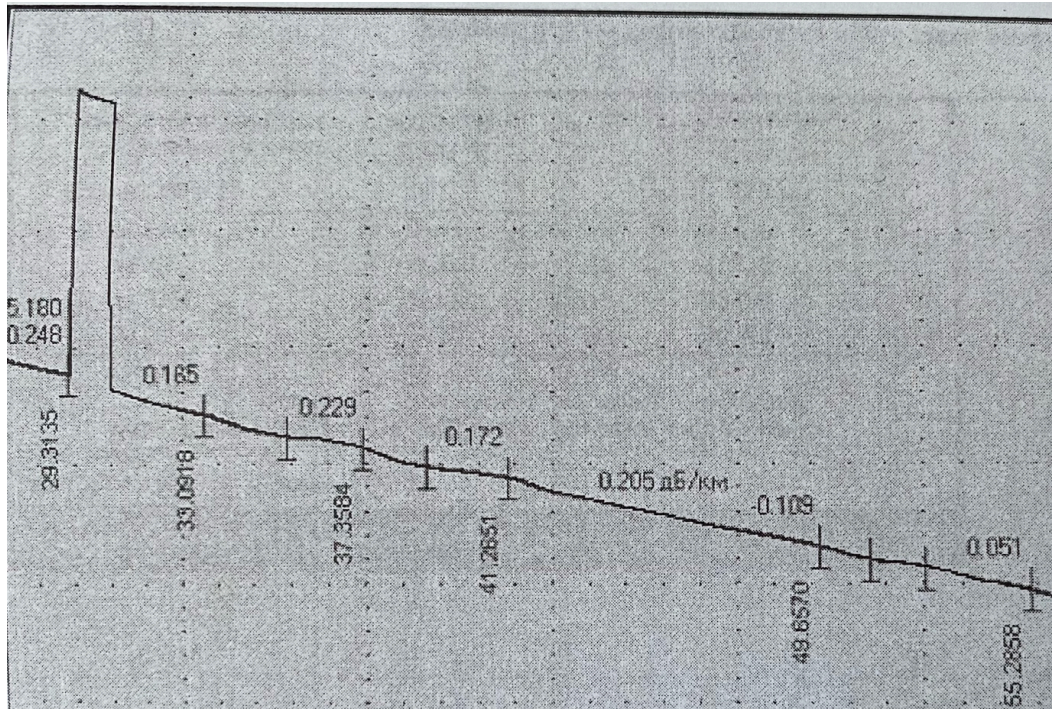


Рис. 4.2.12 Рефлектограма подій при вимірюваннях

Для цієї ж ділянки кабелю було знято рефлектограму з урахуванням скрутки (рис.4.2.13): коефіцієнт скрутки волокна $Z=3,585\%$; скоригований показник заломлення $n_c=1,51027$.

Після компенсації наявності скрутки значення відстаней на рефлектограмі дорівнюють фактичній довжині ОК до подій. Для розглянутої події (зварного з'єднання на відстані 49,6570 км) фактична довжина ОК до події дорівнює 47,9384 км. Похибка, внесена при вимірюванні відстані до події через відхилення показника заломлення, установленого на рефлектометрі, від показника заломлення для кожної ділянки вимірювання, становить $+3,585\%$. Таким чином, різниця між оптичною довжиною волокна в кабелі і фактичною довжиною до події становить 1,7186 км.

Наведені розрахунки на практиці дають змогу точніше визначати відстань до місця пошкодження. Однак, для скорочення часу пошуку пошкоджень на місцевості необхідно також враховувати кількість ОК на 1000 м (1010...1025 м залежно від умов прокладання) траси та аварійний запас ОК, який передбачають при монтажі муфти між двома будівельними довжинами. Як правило, запас ОК становить 15...20 м з кожного боку змонтованої муфти.

На рефлектограмі, наведеній на рис.4.2.13, спостерігається зміна кілометричного загасання після відповідного коригування показника заломлення. Цей ефект проявляється в результаті зміни кута нахилу рефлектограми. Зрозуміло, що враховувати потрібно значення кілометричного загасання, отримані до коригування показника заломлення.

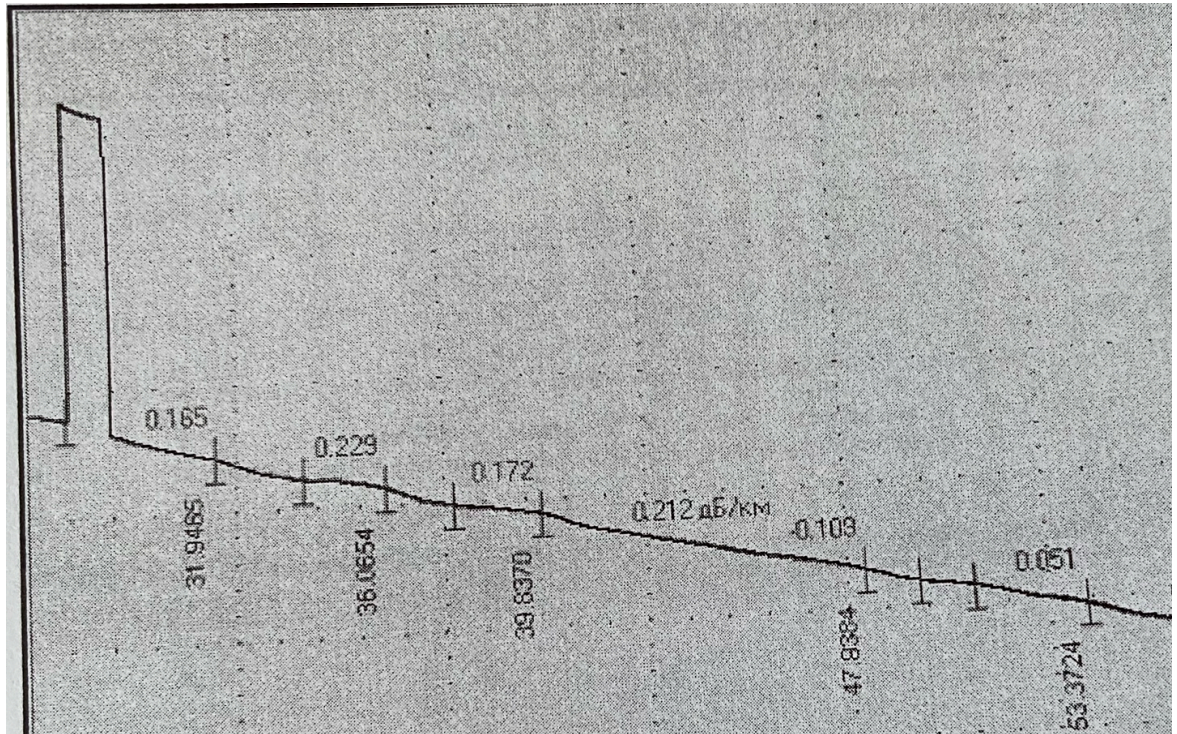


Рис. 4.2.13 Рефлектограма подій після компенсації наявності скрутки

Особливості при вимірюваннях за допомогою оптичного рефлектометра

Зазвичай, при вимірюваннях одномодового ОВ виміри проводяться на двох довжинах хвиль 1550 нм та 1310 нм. При вхідному контролі вимірюється оптична довжина та кілометричне загасання. Для правильного визначення оптичної довжини ОВ необхідно ідентифікувати кінець ОВ за сплеском Френелівського відбиття на екрані ОР та правильно розмістити курсор. Початок ОВ також відображається різким викидом вгору сигналу за рахунок відбиття від вхідного роз'єму ОР.

Якщо при вимірюваннях тільки з одного боку ОВ спостерігається суттєва різниця між паспортними даними та отриманими результатами вимірювань оптичної довжини ОВ кабелю, то потрібно виконати додаткове вимірювання з іншого боку.

Також при вхідному контролі ОВ аналізують на відсутність неоднорідностей, що перевищують 0,1 дБ, та тріщин. Типовий вигляд рефлектограми ОВ з зазначеними дефектами показаний на рис.4.2.14.

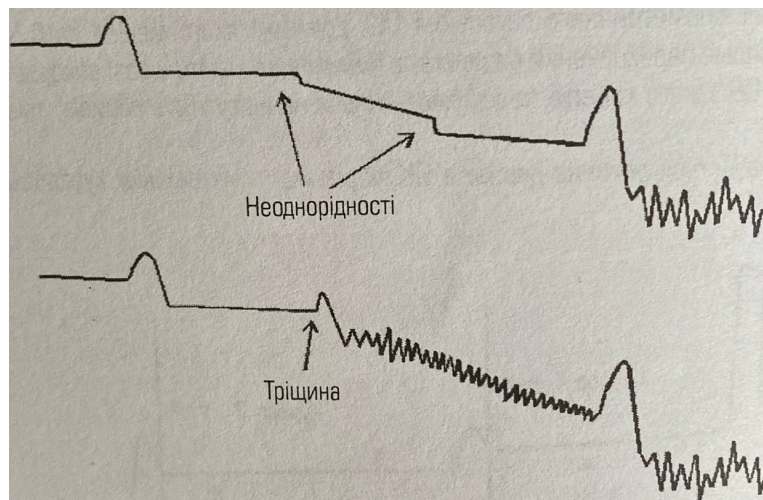


Рис.4.2.14 Типовий вигляд рефлектограми ОВ з дефектами

Для визначення кілометричного загасання ОВ курсори потрібно розміщувати тільки на ділянках, де рефлектограма змінюється лінійно, виключаючи ділянки з перехідними процесами після Френелівського відбиття та неоднорідності понад 0,1 дБ.

Явище “підсилення”

При проведенні вимірювань за допомогою ОР часто на рефлектограмі у місцях зварювання ОВ виникає явище “підсилення” сигналу зворотного розсіяння, тобто хибне збільшення рівня сигналу (рис. 4.2.15).

ОР вимірює зворотне розсіювання оптичного сигналу на відміну від фізичного загасання за довжиною волокна. При вимірюваннях у точках зварювання ОВ отримати точне відображення втрат буває складно через невеликі відхилення у характеристиках ОВ, внаслідок чого на рефлектограмі з'являється “від'ємне загасання” (хибне підсилення).

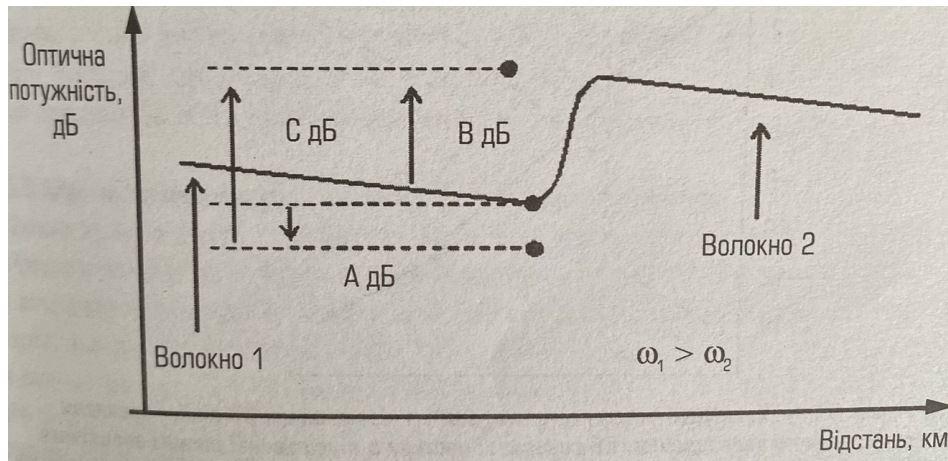


Рис.4.2.15 Вигляд уявного “підсилення” рівня потужності на рефлектограмі (збільшене зображення)

Результат вимірювання за допомогою ОР являє собою інтегровану суму зворотного розсіювання оптичного сигналу від різних точок по довжині ОВ. ОР усереднює це зворотне розсіювання сигналу за припущення, що вздовж усього волокна вимірювання будуть мати послідовний характер. Недоліком такого методу є те, що в точці зварювання ОВ кількість зворотно розсіяного сигналу до зрощування, яке приходить на вхід ОР, може бути більшою, ніж після нього або навпаки. Такі різниці у кількості зворотно розсіяного сигналу, що повертається на вхід ОР, є результатом різниці діаметрів модового поля двох зварюваних оптичних волокон. Точніше, коефіцієнт зворотного розсіювання ОВ обернено пропорційний до квадрата діаметра модового поля, а фактичне зворотне розсіювання прямо пропорційне до різниці коефіцієнтів зворотного розсіювання двох ОВ. Таким чином, при зварюванні двох ОВ з різними діаметрами модового поля можуть спостерігатися суттєві розбіжності в потужності розсіяного оптичного сигналу. В залежності від напрямку проведення вимірювань рефлектометр відобразить ці розбіжності або як підсилення, тобто видиме збільшення рівня потужності, або як значно більші втрати. При вимірюванні в напрямі від ОВ з більшим діаметром модового поля до ОВ з меншим діаметром рефлектометр покаже “підсилення” рівня потужності (рис.4.2.15). І навпаки, при вимірюванні в зворотному напрямі ОР відобразить значно більші втрати (“перебільшені”), характерні за відображенням для з'єднання волокон.

На рис.4.2.15 значення А (дБ) - це дійсні або фактичні втрати, В (дБ) - втрати, які відображаються на екрані ОР, а С (дБ) - втрати (зворотне розсіювання) внаслідок розбіжності діаметрів модового поля відповідно ω_1 і ω_2 .

Коли різниця діаметрів призводить до появи на екрані ОР “підсилення” або “перебільшення” втрат, фактично втрати на зварювання ОВ відносно невеликі. Навіть у разі зварювання двох ОВ з діаметрами модового поля 8,8 і 9,8 мкм фактор розбіжності діаметрів модового поля додасть до фактичного значення втрат на зварювання не більше як 0,04 дБ.

Саме через ці штучні “підсилення” та “перебільшені” втрати процедура випробувань ОВ за допомогою ОР вимагає проводити вимірювання втрат з обох боків, а потім, щоб досягти прийнятної точності, усереднювати результати.

Фальшиві відбиття

Фальшиві відбиття, так звані “фантоми” з'являються на рефлектограмі, зазвичай, при неправильному виборі діапазону вимірювання відстані (рис.4.2.16). Джерелом таких помилкових сплесків на рефлектограмі може бути Френелівське відбиття. Нехай існує Френелівське відбиття від кінця ОВ довжиною l при встановленому діапазоні довжини, яка набагато більша за довжину ОВ. Відбитий оптичний сигнал повертається до оптичного роз'єму ОР, відбивається від нього, створюючи новий зондувальний імпульс (рис.4.2.16). Фальшивий сплеск (“фантом”) з'являється на екрані на відстані, вдвічі більшій за довжину ОВ, що може бути однією з ознак “фантома” (а) на рефлектограмі. Можлива поява “фантома” на потрібній відстані залежно від рівнів Френелівського відбиття, довжини ОВ та динамічного діапазону ОР. Це найпростіший випадок, але ситуація може ускладнитися за наявності кількох потужних Френелівських відбиттів. Сигнал, відбитий від одного роз'єму до іншого, може створювати сплески (б). Фальшивий сплеск відрізняється від реального відсутністю загасання, що вноситься у волоконно-оптичну лінію.

Для розпізнавання “фантому” на рефлектограмі зменшують, якщо це можливо, відбитий сигнал, використовуючи для цього допоміжне ОВ. Тоді фальшивий сплеск зменшується або зникає з екрана. Важливо, щоб встановлений

діапазон вимірювання був на одну третину більший за довжину ОВ, щоб не накладалися сигнали.

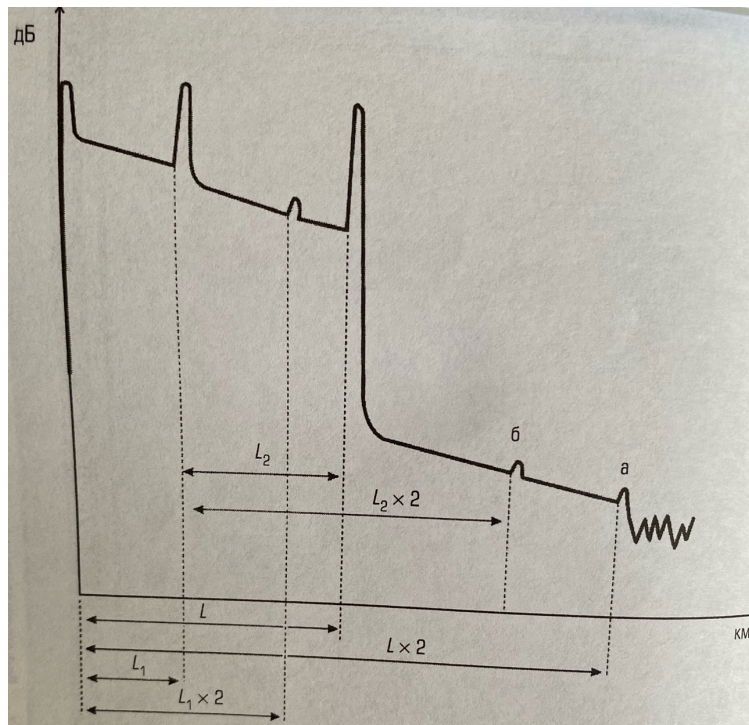


Рис. 4.2.16 Приклади “фантомів”, розміщених на подвоєних відстанях від відбиваючих подій

Таким чином, для визначення, чи є “фантомом” сплеск Френелівського відбиття, необхідно перевірити на рефлектограмі, чи існують втрати, що вносяться, в місті відбиття, а також для контролю провести вимірювання у діапазоні відстаней, який приблизно втричі перевищував би оптичну лінію (при цьому треба пам'ятати, що “точність” рефлектограми зменшується, оскільки період взяття відліків збільшується, якщо в застосовуваному ОР відсутній спеціальний режим високого розділення на виділеній ділянці використовуваного діапазону вимірювань).

Можна також використовувати розчин гліцерину, незначна кількість якого наноситься на торець з'єднувальної вилок або оголене ОВ на протилежному від ОР кінці оптичної лінії. У будь-якому разі, якщо на рефлектограмі справді спостерігається хибний сплеск Френелівського відбиття, то після вжиття перелічених заходів він має зникнути.

Вимірювання основних параметрів ОВ за допомогою ОР-2-2

При проведенні вимірювань рефлектограми зворотного розсіювання зберігають в пам'яті комп'ютера, щоб потім можна було ретельніше проаналізувати. Вікно відкриття файлу виглядає наступним чином (рис.4.2.17).

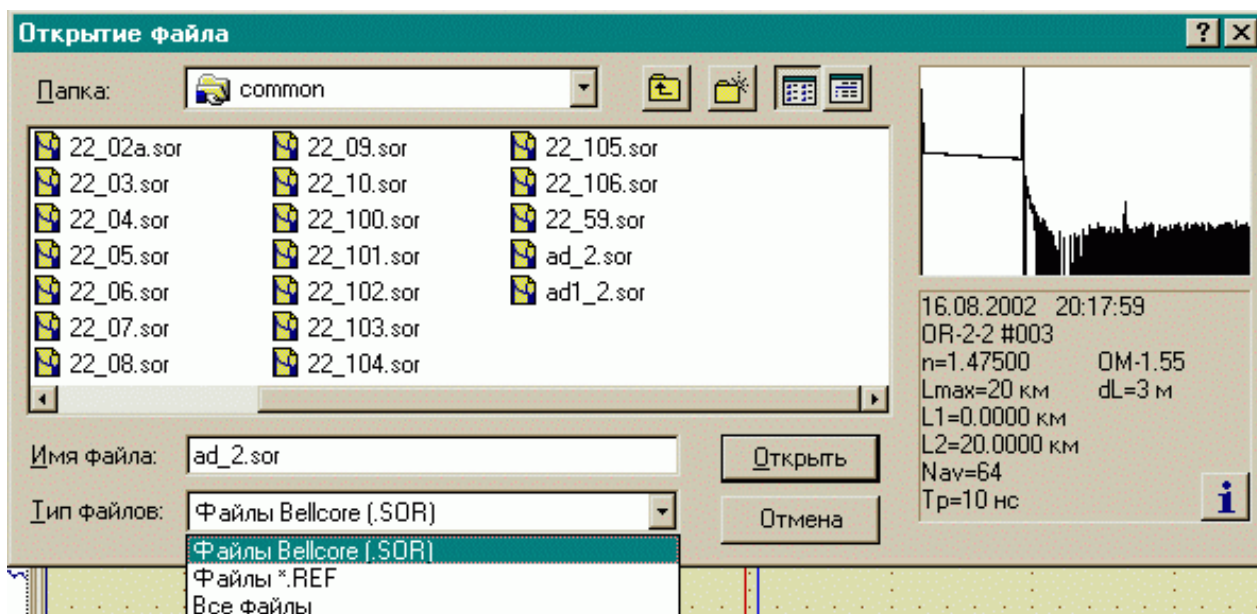


Рис.4.2.17 Відкриття файлу

Інформація, що відображається у вікні з рефлектограмою, наведена на рис.4.2.18.

У цьому вікні відображаються рефлектограма та два рухомих вертикальних маркери, положення яких щодо початку ОВ вказується у двох верхніх рядках інформаційної панелі зліва.

У нижній частині вікна розташовані рядки, що вказують:

- координати лівої та правої меж вікна по горизонталі та масштаб по горизонталі;
- координати верхньої та нижньої меж вікна по вертикалі та масштаб по вертикалі;
- параметри режиму вимірювання рефлектограми, а саме: тип оптичного волокна та довжина хвилі, на якій проводяться вимірювання; n - значення показника заломлення ОВ; L_{max} – діапазон відстаней; T_r - тривалість зондувального імпульсу; N_{av} - Параметр, що характеризує загальну кількість усереднень рефлектограми; L_1 – відстань від початку ОВ до

початку вимірюваної ділянки, км; L2 - відстань від початку ОВ до кінця вимірюваної ділянки, км; dL – роздільна здатність.

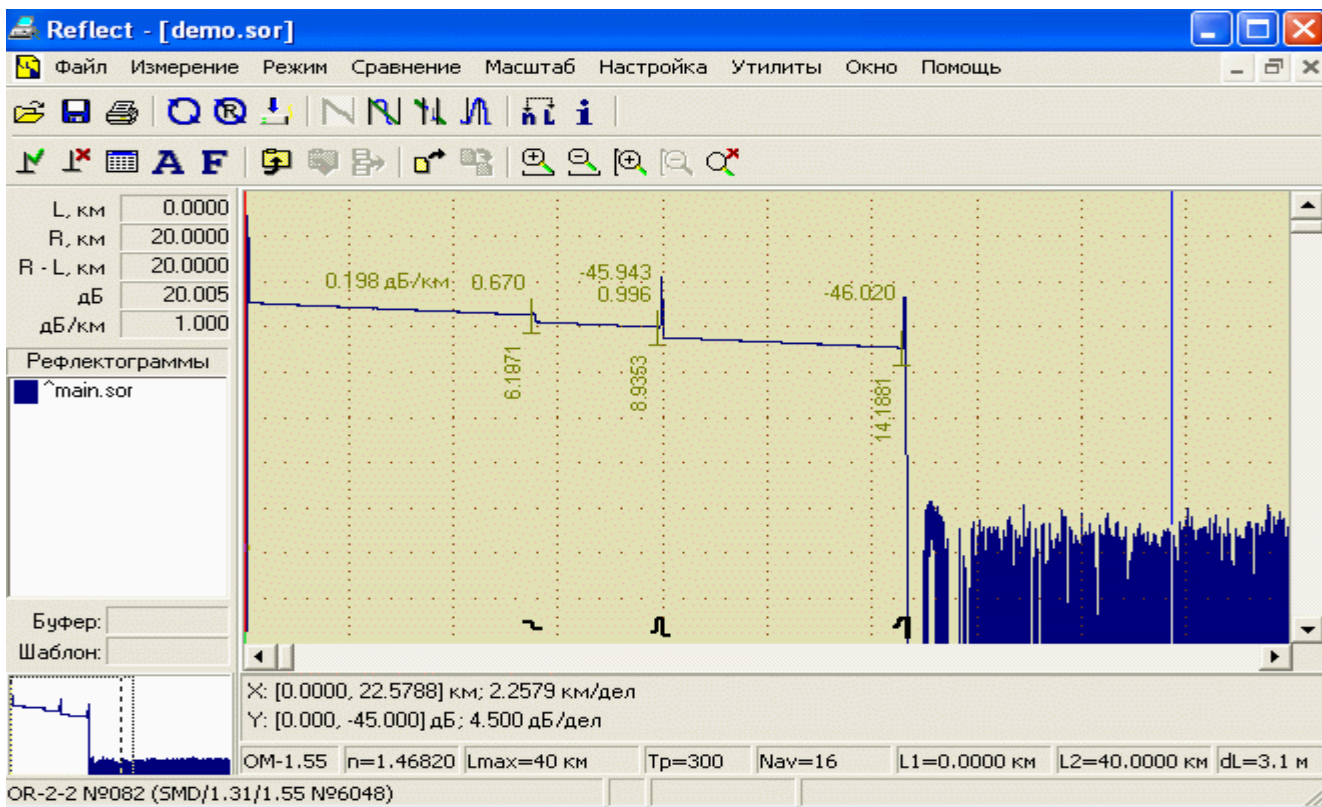



Рис.4.2.18 Інформація, що відображається у вікні з рефлектограмою

При вимірі загасання по двох точках або для повернення в цей режим вимірювань з іншого режиму необхідно вибрати пункт меню Режим → Вимірювання загасання по двох точках, або натиснути кнопку , або натиснути клавішу R.

Для вимірювання загасання будь-якої ділянки ОВ (рис.4.2.19) та її довжини слід встановити маркери на кінцях цієї ділянки та прочитати його характеристики у верхній таблиці інформаційної панелі : довжина ділянки R-L, км, загасання між точками перетину маркерів з рефлектограмою в дБ та величину коефіцієнта загасання в дБ/ км.

При вимірі загасання всього ОВ лівий маркер має бути встановлений поза мертвої зони.

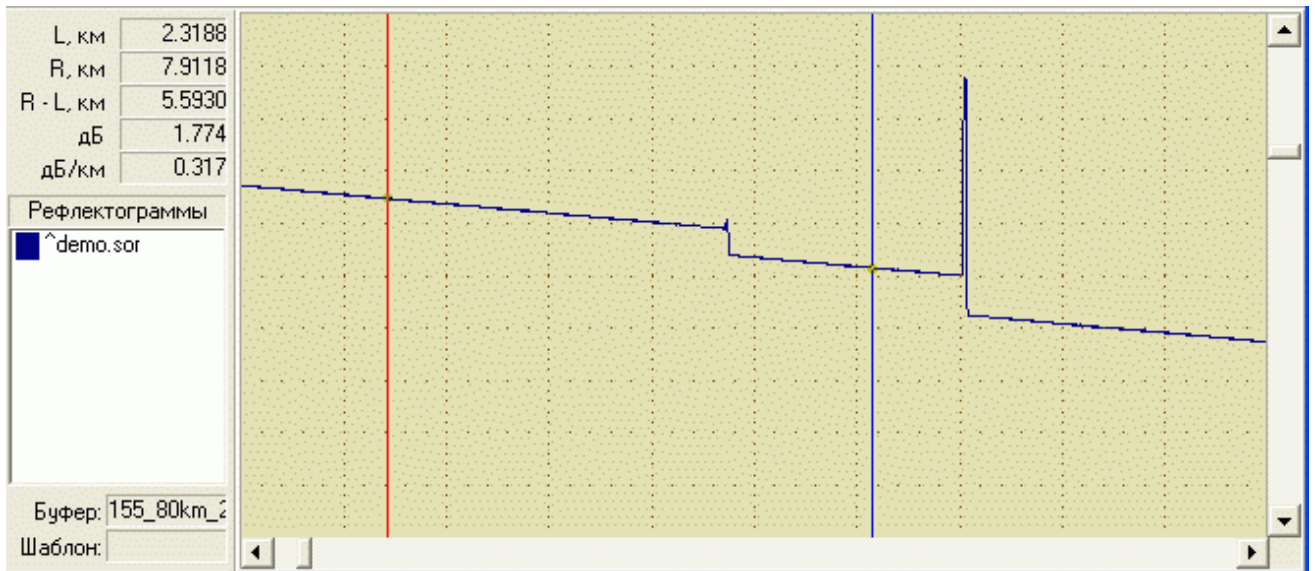



Рис.4.2.19 Вимірювання загасання за двома точками

Вимірювання загасання ОВ при апроксимації рефлектограми

Для підвищення точності вимірювання загасання ділянка рефлектограми між маркерами може бути апроксимована прямою лінією (рис.4.2.20). Реалізація цього режиму забезпечується вибором пункту меню Режим → Вимірювання загасання з апроксимацією, або натисканням кнопки , або натисканням клавіші D.

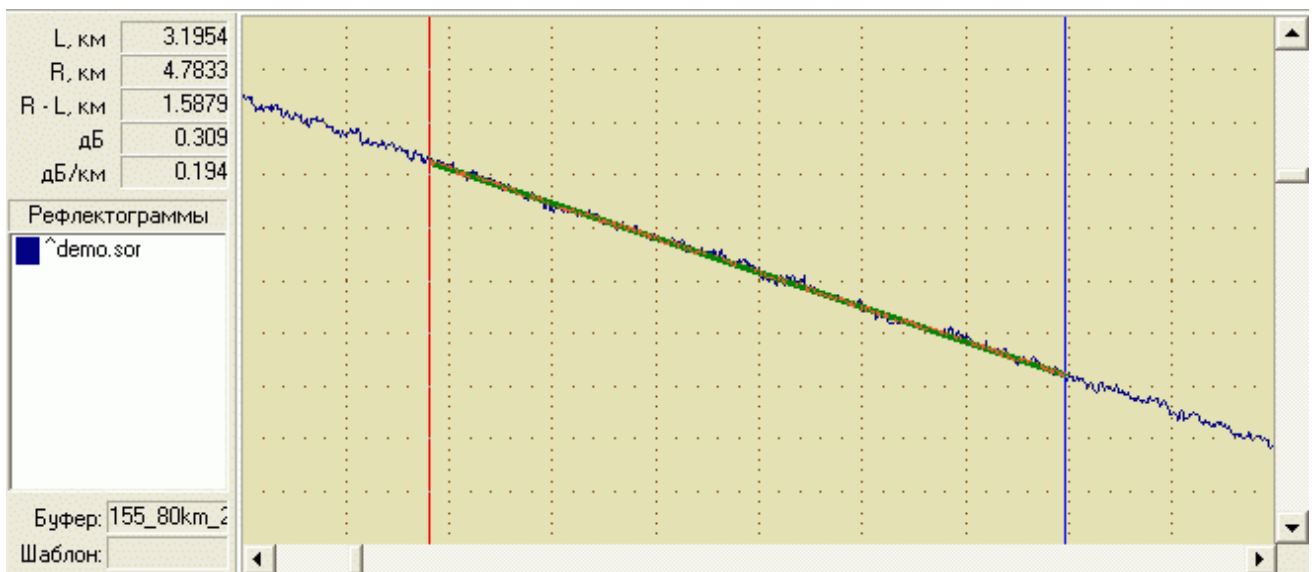



Рис.4.2.20 Вимірювання загасання ОВ при апроксимації рефлектограми

При цьому апроксимуюча пряма відображається на екрані, а результати вимірювання загасання з урахуванням апроксимації – у четвертому та п'ятому рядках таблиць.

Даний спосіб вимірювань слід застосовувати до однорідних ділянок, які не мають з'єднань.

Вимірювання згасання у з'єднанні ОВ

Програма дозволяє визначити загасання у поєднанні ОВ методом п'яти маркерів (рис.4.2.21).

Для цього слід встановити маркери поблизу місця з'єднання так, щоб воно опинилося між ними, вибрати пункт меню Режим → Згасання в з'єднанні ОВ, або натиснути кнопку , або клавішу S. При цьому ділянки деякої довжини ліворуч від лівого і правішого за правий маркерів апроксимуються прямими лініями, і розраховується загасання у поєднанні. Місце з'єднання відзначається вертикальним маркером-стовпчиком, а ділянки апроксимації - жирними лініями.

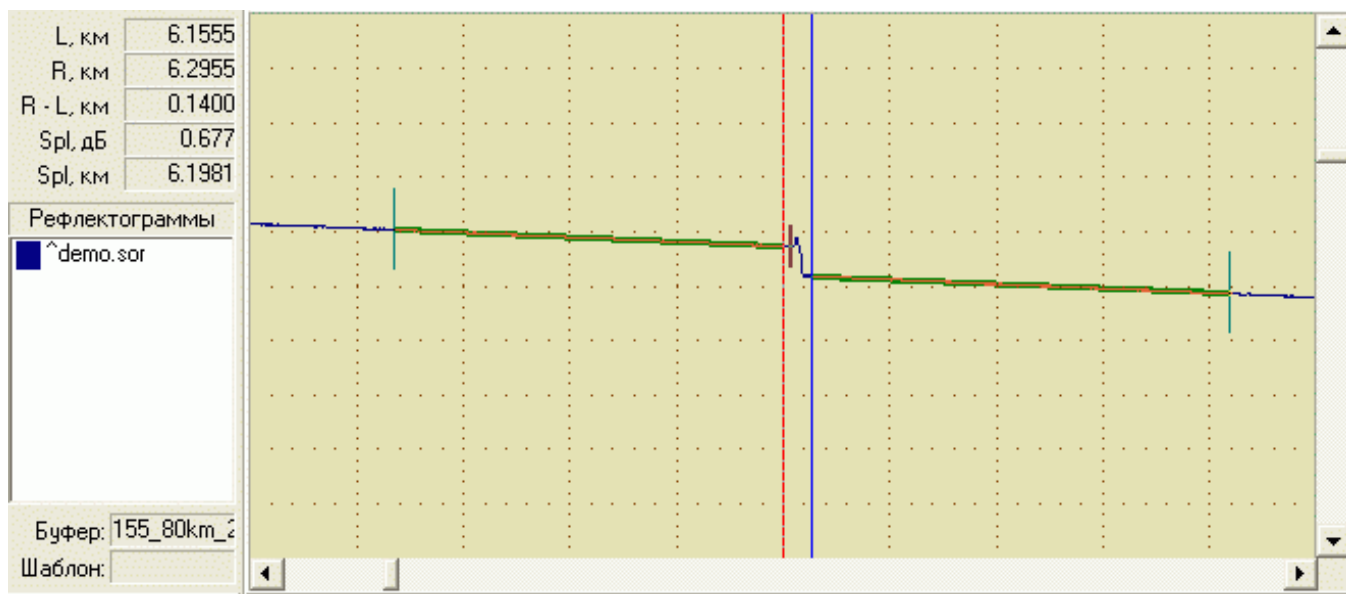


Рис.4.2.21 Вимірювання згасання у з'єднанні ОВ

Усі п'ять маркерів можуть рухатися незалежно один від одного. Ділянки апроксимації повинні, по можливості, мати максимальну довжину і бути

однорідними. Вертикальний маркер-стовпчик слід встановити на лівий край ділянки з'єднання.


Результат вимірювання відображається у четвертому та п'ятому рядках таблиці інформаційної панелі:

Spl, дБ - загасання в з'єднанні,

Spl, км - відстань від початку ВВ до місця з'єднання (до центрального маркера-стовпчика).

Вимірювання коефіцієнта відбиття

Для вимірювання коефіцієнта відбиття (рис.4.2.22) від роз'ємного з'єднання двох ОВ або від кінця ОВ слід правий маркер встановити на вершину відбитого імпульсу, лівий - на ділянку рефлектограм безпосередньо перед ним. Потім

натисніть кнопку , або клавішу R, або виберіть пункт Режим → Коефіцієнт відображення. Результат вимірювання відображається у четвертому та п'ятому термінах таблиці інформаційної панелі:

Refl, дБ - коефіцієнт відображення,

Refl, км - відстань від початку ОВ до лівого маркера

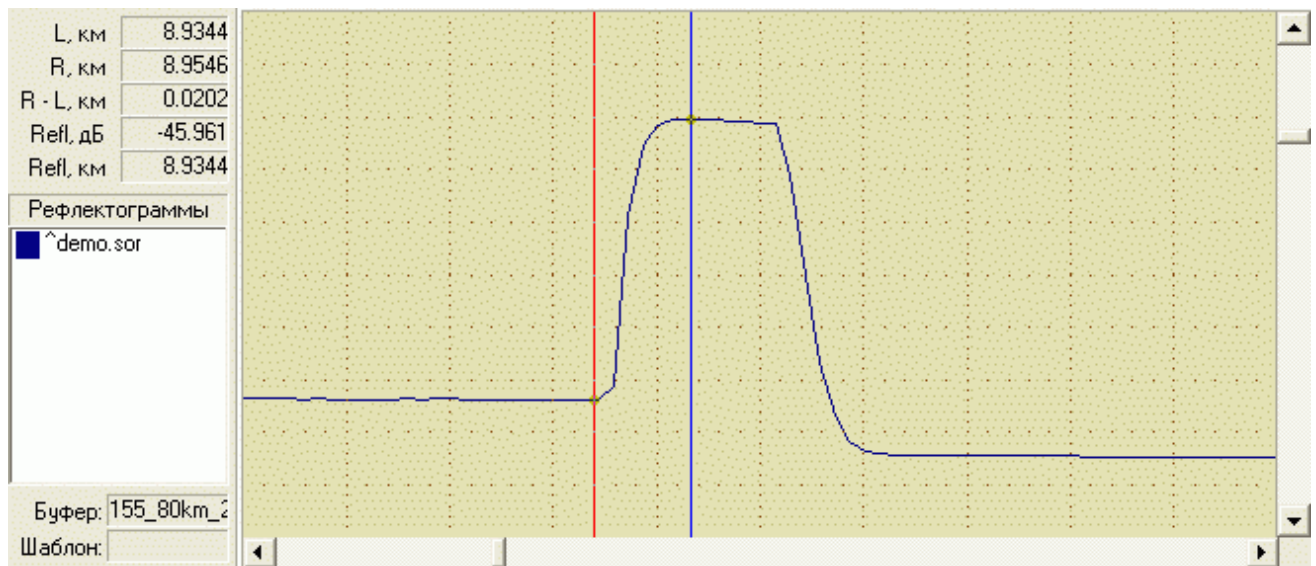



Рис.4.2.22 Вимірювання коефіцієнта відбиття

Вимірювання ORL

Для вимірювання ORL (optical return loss) (рис.4.2.23) ділянки ОВ або всієї лінії слід встановити маркери на кінцях ділянки, що вимірюється. Потім натисніть кнопку  або клавішу O, або виберіть пункт Режим → ORL.

Результат вимірювання ORL відображається у п'ятому рядку таблиці інформаційної панелі (рис.4.2.23).

ORL, дБ - відношення потужності, що вводиться в ОВ, до потужності, що повернулася на початок ОВ від заданої ділянки або всієї лінії.

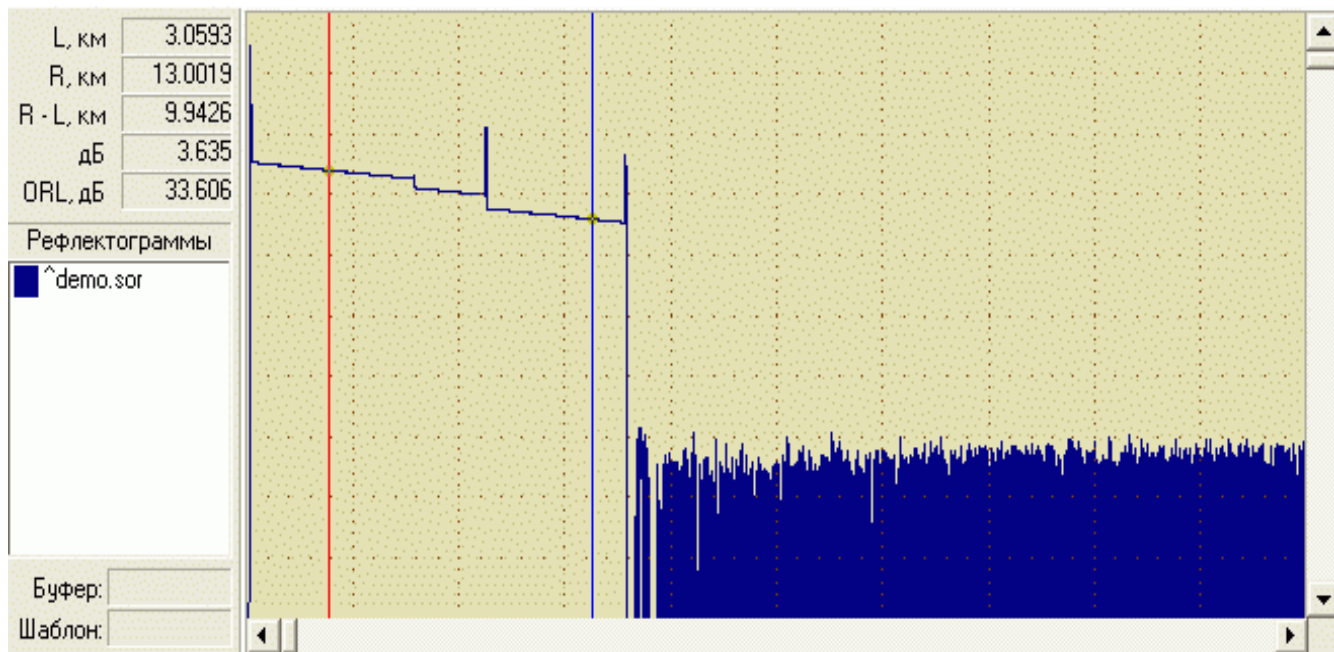


Рис.4.2.23 Вимірювання ORL

Якщо на рефлектометрі включити режим автоматичних вимірювань, то результати вимірювань можна побачити на рефлектограмі (рис.4.2.25) або окремо у таблиці відміток (рис.4.2.24).

№		Расстояние, км	Коэффициент отражения, дБ	Затухание в соединении, дБ	Коэффициент затухания, дБ/км	Суммарное затухание, дБ	
0	R	0.0000	-47.697				F
1	S	25.1302		0.391	0.195	4.900	F
2	S	40.1773		0.377	0.201	8.316	F
3	S	50.3005		0.374	0.200	10.718	F
4	R	56.4296	-40.806	0.215	0.199	12.311	F

Комментарий:

Затухание в линии: 21.200 дБ
Optical return loss (ORL): 30.939 дБ

Удалить
Маркеры
Переместить

Рис.4.2.24 Таблица відміток

У таблиці відміток закладка "Неоднорідності" містить:

- номер неоднорідності по порядку;
- тип неоднорідності:

R - неоднорідність "з відбиттям", коли коефіцієнт відбиття більше порогового значення незалежно від загасання в неоднорідності;

S – неоднорідність "без відбиття", коли коефіцієнт загасання більший, а коефіцієнт відбиття менший від відповідних порогових значень;

- відстань від початку ОВ до поточної неоднорідності, км;
- коефіцієнт відбиття в неоднорідності (якщо він перевищує граничне значення), дБ;
- загасання в неоднорідності, якщо воно перевищує порогове значення, дБ;
- коефіцієнт загасання ділянки між цією неоднорідністю та попередньою, дБ/км;
- сумарне загасання ОВ від початку лінії до поточної неоднорідності, дБ;
- код позначки.

Залежно від встановлених налаштувань програми, у вікні з рефлектограмою можуть виводитися значки позначок у нижній частині цього вікна, або (I) позначки на самій рефлектограмі із зазначенням їх чисельних параметрів (рис.4.2.25), а саме:

- відстань до позначки у кілометрах - вертикальні написи під позначкою без вказівки розмірності;
- величина коефіцієнта загасання ділянки, заданої оператором - горизонтальний напис під ділянкою, дБ/км;
- величина коефіцієнта загасання ділянки між неоднорідностями - горизонтальний напис над ділянкою, дБ/км;
- коефіцієнти відбиття (якщо є) та загасання в неоднорідності в дБ, без вказівки розмірності – горизонтальні написи над неоднорідністю.

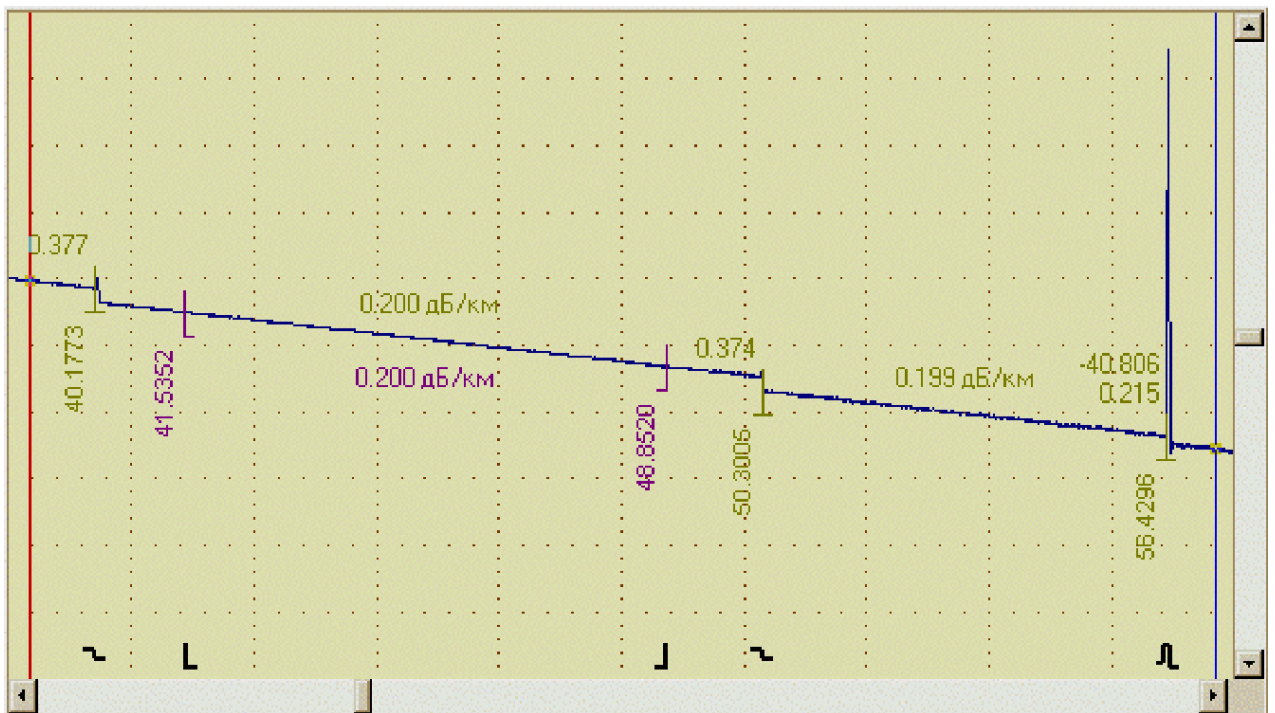


Рис.4.2.25 Відмітки на рефлектограмі

Контрольні питання

1. На аналізі якого сигналу заснований принцип дії оптичного рефлектометра?
2. Пояснити принцип роботи ОР.
3. Чому перед вимірюваннями важливо виставити параметри вимірювань ОР?
4. Як просторова роздільна здатність ОР залежить від тривалості зондуючого імпульсу?
5. Тривалості імпульсу ОР 300 нс і 10 мкс. В якому випадку у ОР буде більше динамічний діапазон і чому?
6. Яка “мертва зона” ширша, за неоднорідністю чи за загасанням? Чому?

7. На що впливає час усереднення в ОР?
8. Чому виникають хибні відбиття і як їх позбутися?
9. Чому для визначення загасання в зварюванні використовують метод п'яти маркерів і в чому він полягає?
10. Як будуть відрізнятися рефлектограми зворотного розсіювання, зняті для однієї й тієї ж лінії на довжинах хвиль 1310 та 1550 нм?

Список посилань

1. https://nettech.ua/p-dv-sniy-vok/kabel-volokonno-optichniy-lankore-ut-012-sm-adss-1-0kn_4070
2. https://nettech.ua/optichniy-kabel/kabel-volokonno-optichniy-ftth-002-sm_3900
3. <https://nettech.ua/news/tsikl-svarki-opticheskogo-volokna-avtomaticheskogo-svaroc-hnogo-apparata>
4. <https://ott.net.ua/volokonno-optychne-zvaryuvannya-osoblyvosti-ta-zastosuvannya>
5. <https://www.corning.com/optical-communications/worldwide/en/home/Resources/resource-library>
6. https://www.corning.com/optical-communications/worldwide/en/home/Resources/resource-library/search.html?productsSearchState=&resourcesSearchState=fq%3D%257B!tag%253Dhierarchicalfacet_applications_en_us_s%257Dhierarchicalfacet_applications_en_us_s%253A%2528%2522Optical%2520Fiber%2522%2529%26fq%3D%257B!tag%253Dresource_types_en_us_s%257Dresource_types_en_us_s%253A%2528%2522Brochures%2522%252BOR%252B%2522Product%2520Specifications%2522%2529%26&relatedContentSearchState=&utm_source=&utm_medium=&initialResultType=resources
7. <https://ecatalog.rdm.com/ww/en/catalogue>
8. <https://optokon.ua>
9. <https://deps.ua/ua/katalog.html>
10. <https://odeskabel.com/ua/products/katalog-vok.html>
11. Технічний опис комплекту оптичних тестерів OLS, OLA, OLP
12. Довідкові відомості з проведення рефлектометричних вимірювань Укртелекому
13. Технічний опис рефлектометра ОР-2-2
14. ITU-T G.651.1: Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable for the optical access network
15. ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable

16. ITU-T G.653: Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable
17. ITU-T G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable
18. ITU-T G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable
19. ITU-T G.691: Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers
20. ITU-T G.692: Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers
21. ITU-T G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid
22. ITU-T G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid
23. Каток В.Б., Руденко І.Е., Ранський Є.Г., Однорог П.М. Волоконно-оптичний зв'язок / Під ред. Катка В.Б. – Київ: Логос, 2015. – 383 с.