



Чорноус С.М., Цюцюра М.І., Шестак Я.І.

ОПТИКО- ВОЛОКОННІ МЕРЕЖІ

Навчальний посібник



Чорноус С.М., Цюцюра М.І., Шестак Я.І.

ОПТИКО- ВОЛОКОННІ МЕРЕЖІ

Навчальний посібник

Київ
2025

УДК 621.391.822(075.8)
ББК 32.973.2я73
К 93

Копіювання, сканування, запис на електронні носії і тому подібне, книжки в цілому, або будь-якої її частини заборонено

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол №5 від 27 листопада 2025 р.)

Рецензенти:

Євсєєв Сергій Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри кібербезпеки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Смолій Вікторія Миколаївна, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем і технологій Національного Університету біоресурсів та Природокористування України.

Зверєв Володимир Павлович, кандидат технічних наук, с.н.с., заступник керівника служби з питань інформаційної безпеки та кібербезпеки – керівник управління інформаційної безпеки Апарату Ради Національної безпеки і оборони України.

Зінченко Ольга Валеріївна, доктор технічних наук, завідувач кафедри штучного інтелекту Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

ПН ОПТИКО-ВОЛОКОННІ МЕРЕЖІ: Посібник для студентів ЗВО/
С.М. Чорноус, М.І. Цюцюра, Я.І. Шестак // - К.: НУБіП України, 2025.- 218 с.

ISBN

Зміст навчального посібника відповідає навчальній програмі «Оптично волоконні мережі» дисциплін F5 «Кібербезпека та захист інформації», F7 «Комп'ютерна інженерія». Посібник буде корисний студентам, аспірантам та викладачам закладів вищої освіти.

© Чорноус С.М., Цюцюра М.І., Шестак Я.І. 2025
© НУБіП України, 2025

ISBN

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



Чорноус Сергій Миколайович. Старший викладач кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки Національного університету біоресурсів і природокористування України, Україна. Коло наукових інтересів: інформаційні технології, інформаційні системи, волоконно-оптичні мережі, системи віртуалізації, системи OTN-DWDM. Електронна адреса: s.chornous@nubip.edu.ua



Цюцюра Микола Ігорович. Професор кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки Державного торговельно-економічного університету. Доктор технічних наук, професор. Коло наукових інтересів: Інформаційні технології розвитку змісту освіти Комп'ютерні науки. Інформаційні системи і технології. Онтологічні інформаційні системи. Інформаційні технології розвитку та гармонізації освітньої сфери України та кадрової політики. Інформаційний пошук та наукові дослідження. Програмування. Об'єктно-орієнтоване програмування. Теорія інформації. Архітектура проектування програмного забезпечення складних систем. Електронна адреса: mitsutsura@dteu.edu.ua



Шестак Ярослав Іванович. Старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки Державного торговельно-економічного університету. Доктор PhD (F3). Коло наукових інтересів: Хмарні технології, інформаційні технології, інформаційні системи, інформаційний простір ЗВО. З ним можна зв'язатися електронною поштою: Електронна адреса: shestack@knute.edu.ua

ЗМІСТ

Передмова	6
1. Основи волоконно-оптичних систем та їх компоненти. Введення в теорію волоконно-оптичних систем	7
1.1. Основні закони оптики	7
1.2. Заломлення та віддзеркалення світла.....	12
1.3. Що таке Децибел (dB).....	13
Загальні питання для самоконтролю до розділу.....	16
2. Оптичне волокно	17
2.1. Переваги ВОЛЗ.....	17
2.2. Недоліки ВОЛЗ.....	18
2.3. Основні параметри оптичного волокна та розповсюдження світла по волокну.....	18
2.3.1. Згасання.....	19
2.3.2. Геометричні параметри волокна	22
2.3.3. Дисперсія	26
2.4. Типи оптичних волокон.....	28
2.5. Оптичний бюджет у волоконно-оптичних лініях.....	46
Загальні питання для самоконтролю до розділу	49
3. Пасивне обладнання оптичне обладнання.....	51
3.1. Оптичний кабель	51
3.2. Оптичні роз'єми	66
3.2.1. Типи полірування.....	73
3.2.2. Якість з'єднання.....	78
3.3. Оптичні кроси (ODF)	79
3.4. Оптичні муфти.....	84
3.5. Патчкорди та пігтейли	89
3.6. Оптичні атенюатори.....	92
3.7. Спліттери.....	92
3.8. Оптичні реле	97
3.9. Мультиплексори та демультіплексори: спектральне ущільнення каналів.....	98
3.9.1. Технологія WDM	102
3.9.2. Технологія CWDM.....	103
3.9.3. Технологія DWDM.....	108
3.10. Циркулятори	114
Загальні питання для самоконтролю до розділу	115
4. Активне обладнання оптичне обладнання	116
4.1. Оптичні приймачі-передавачі	116
4.1.1. Форм-фактори	116
4.1.2. Типи лазерів.....	133
4.1.3. Функціональність Digital Diagnostic	134
4.2. Медіаконвертери	135

4.3.	Підсилювачи потужності EDFA	137
4.4.	Раманівські підсилювачі.....	142
4.5.	Компенсатори дисперсії	149
4.6.	PON - як різновид технології FTTx	151
	Загальні питання для самоконтролю до розділу	161
5.	Вимірювальне обладнання.....	163
5.1.	Оптичні тестери.....	164
5.1.1.	Методи вимірювання згасання	167
5.2.	Оптичні рефлектометри.....	169
	Загальні питання для самоконтролю до розділу	171
6.	Оптична транспортна мережа (OTN) та її взаємодія з DWDM системами.....	173
6.1.	OTN - що це таке і чому вона важлива.	173
6.2.	Що таке когерентна передача? Кілька слів про когерентну передачу сигналів.	182
6.3.	Інтеграція OTN з DWDM.	183
6.4.	Основний стандарт OTN: ITU-T G.709.....	185
6.5.	Переваги OTN: корекція помилок, моніторинг з'єднань, масштабованість.	189
6.6.	Аналіз майбутнього розвитку оптичної транспортної мережі (OTN).....	190
6.7.	Використання OTN (Optical Transport Network) для підвищення ефективності віртуалізації в мережах ЗВО.....	192
	Загальні питання для самоконтролю до розділу	197
7.	Захист інформації на лінійно-кабельних спорудах волоконно-оптичних мереж.....	199
7.1.	Особливості передачі даних через ВОЛЗ та актуальність питань інформаційної безпеки в оптичних мережах.....	199
7.2.	Огляд потенційних загроз та вразливостей.....	200
7.3.	Пасивні методи несанкціонованого доступу.....	201
7.4.	Активні методи втручання в роботу ВОЛЗ.....	202
7.5.	Технології захисту волоконно-оптичних ліній зв'язку.....	205
	Загальні питання для самоконтролю до розділу	207
	Глосарій термінів, скорочень та аббревіатур	209
	Список використаної літератури	214

Передмова

У сучасному світі волоконно-оптичні технології відіграють ключову роль у розвитку інформаційних систем, телекомунікацій, медичних технологій, наукових досліджень та інших галузей. Прогрес у цих сферах значною мірою зумовлений інноваціями в галузі оптики, яка стала невід'ємною частиною глобальної інформаційної інфраструктури. Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) забезпечують швидке, надійне та масштабоване передавання даних, що є основою для функціонування сучасних комунікаційних систем.

Оптичні технології вирізняються високою пропускнуою здатністю, низьким рівнем втрат сигналу та стійкістю до електромагнітних перешкод, що робить їх незамінними у передачі великих обсягів інформації на великі відстані. Ці технології знаходять застосування у різноманітних сферах – від глобальних телекомунікаційних мереж до локальних промислових систем, а також у передових наукових дослідженнях, зокрема в галузі штучного інтелекту та обробки великих даних. Цей навчальний посібник має на меті систематизувати знання про принципи роботи оптичних систем, основи волоконно-оптичних технологій та обладнання, що використовується в цих системах. У початкових розділах розглянуто фундаментальні закони оптики, такі як заломлення та відбиття світла, а також основи вимірювання оптичних параметрів, зокрема поняття децибела (dB) як ключової одиниці в аналізі сигналів. Наступні розділи присвячені волоконно-оптичним технологіям, їхнім перевагам і недолікам, типам оптичних волокон та принципам поширення світлового сигналу через волокно. Особливу увагу приділено обладнанню волоконно-оптичних систем, зокрема пасивним елементам (волокна, кабелі, патч корди, пігтейли, роз'єми, спліттери, мультиплексори) та активним елементам мережі (оптичні приймачі-передавачі, медіаконвертери, підсилювачі сигналу), які забезпечують ефективність і надійність роботи ВОЛЗ. Окремо розглянуто вимірювальне обладнання, зокрема оптичні рефлектометри, які використовуються для діагностики стану волоконно-оптичних ліній, аналізу згасання сигналу та виявлення несправностей.

Мета посібника – надати ґрунтовні теоретичні знання та практичні навички, необхідні для роботи з волоконно-оптичними системами. Посібник розрахований на студентів, які вивчають оптику та телекомунікації, а також на інженерів і фахівців, які прагнуть поглибити або систематизувати свої знання в цій галузі.

Цей навчальний посібник є результатом колективної праці авторського колективу. Розділи 1, 2, 3, 4 і 5 підготовлені Чорноус С.М. Розділ 6 створено спільними зусиллями Чорноус С.М. та Шестак Я.І. Розділ 7 розроблено Чорноус С.М. у співавторстві з Цюцюрою М.І. Автори висловлюють вдячність усім, хто сприяв підготовці цього видання.

1. Основи волоконно-оптичних систем та їх компоненти. Введення в теорію волоконно-оптичних систем

1.1. Основні закони оптики

В чому ж принципова різниця в передачі сигналів по металевому (наприклад, мідному) та оптичному кабелю? Можливо у швидкості?

Швидкість передачі сигналу в оптичному кабелі та у витій парі залежить від фізичних характеристик середовища передачі, але вона завжди пов'язана зі швидкістю світла, оскільки сигнал передається електромагнітними хвилями.

У оптичному кабелі (оптоволокну) сигнал передається у вигляді світла через скляне або пластикове волокно (саме оптичне волокно представляє собою діелектрик, що складається з серцевини та оболонки з різними коефіцієнтами заломлення - n_1 та n_2). Швидкість світла у вакуумі становить приблизно 299 792 км/с, але в оптоволокну вона зменшується через заломлення в матеріалі (коефіцієнт заломлення скла зазвичай становить близько 1,5). Таким чином, швидкість сигналу в оптоволокну становить приблизно 200 000 км/с (2/3 від швидкості світла у вакуумі). Точне значення може варіюватися залежно від типу волокна (одномодове чи багатомодове) та його характеристик.

У витій парі (мідному кабелі, наприклад, Ethernet-кабелі типу Cat5e або Cat6) сигнал передається у вигляді електричного імпульсу через мідні дроти. Швидкість поширення сигналу тут також залежить від діелектричних властивостей ізоляції та конструкції кабелю. Зазвичай вона становить від 60% до 80% швидкості світла у вакуумі, тобто приблизно 180 000-240 000 км/с. Для більшості кабелів категорії Ethernet це значення ближче до 200 000 км/с.

Оптичний кабель: $\approx 200\ 000$ км/с.

Вита пара: $\approx 180\ 000$ -240 000 км/с (залежить від типу кабелю).

Відповідно, швидкість поширення електромагнітного імпульсу в більшості металевих кабелів буде трохи вищою, за швидкість поширення сигналу в оптичному кабелі.

Але, важливо зазначити, що реальна швидкість передачі даних (пропускна здатність) залежить не лише від швидкості сигналу, а й від затримок, протоколів, кодування та пропускної здатності обладнання. Оптоволокну має значно більшу пропускну здатність (до сотень Гбіт/с), ніж вита пара (зазвичай до 1 – 40 Гбіт/с у сучасних стандартах), хоча швидкість поширення сигналу в них досить близька.

Як бачимо швидкості в мідному та оптичному кабелях приблизно однакові, то чому ж все частіше використовується саме оптичний кабель, а волоконно-оптичних ліній зв'язку стає все більше і більше? Декілька переваг, на яких слід акцентувати увагу: оптичні кабелі мають менші втрати сигналу (0,2-0,3 дБ/км проти 10-20 дБ/км для мідних), окрім того вони нечутливі до електромагнітних перешкод і мають більшу дальність передачі без підсилення.

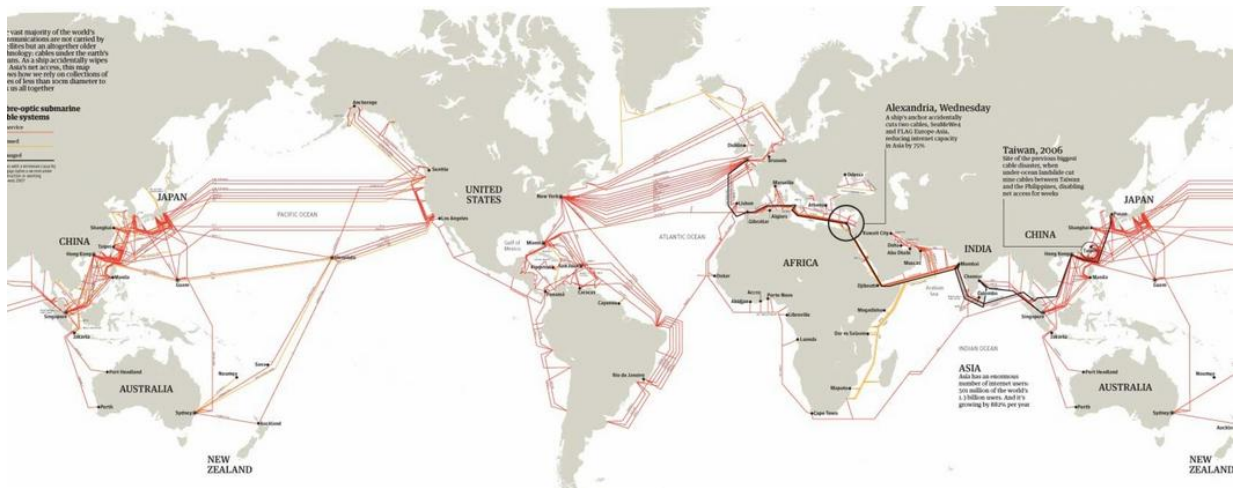


Рис. 1.1. Карта підводних магістральних волоконно-оптичних ліній.

На рисунку 1.1.2. представлена карта підводних магістральних волоконно-оптичних ліній. А по суходолу їх прокладено ще більше. Але якщо рахувати оптичні кабелі, які забезпечують доступ до приміщень абонента, то можемо собі уявити, що земна куля опутана оптичним волокном майже повністю. І виглядає це десь так, як вказано на рисунку, хоча тут відмічені лише магістральні кабелі.

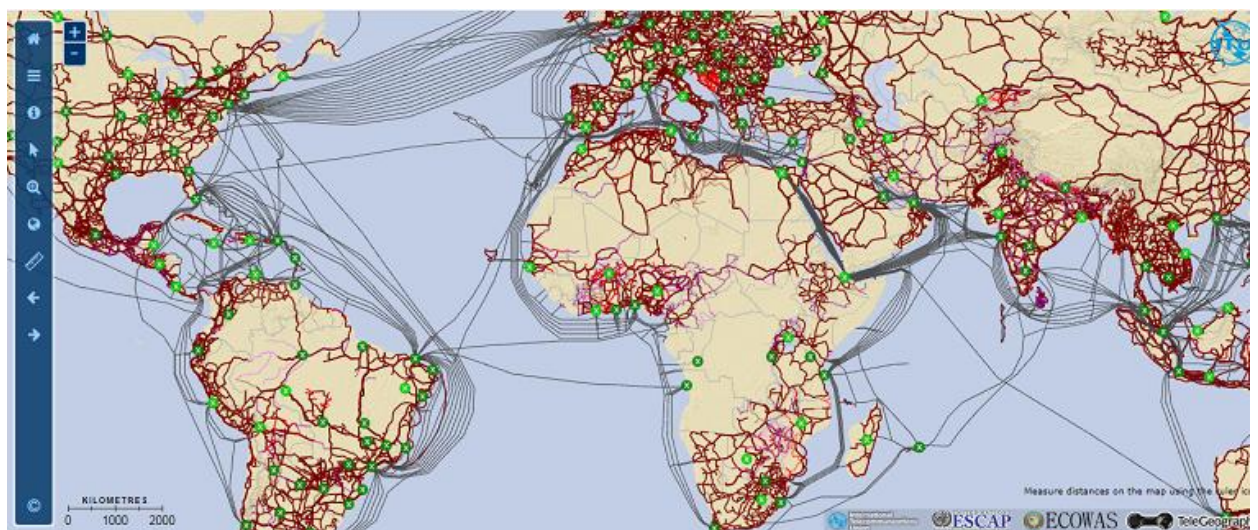


Рис. 1.2. Карта магістральних волоконно-оптичних ліній на суходолі.

Рис. 1.1. та 1.2 наочно показують наскільки широко в сучасному світі використовується оптичний кабель для передачі інформації та побудови інформаційно-комунікаційних мереж.

Знайомство з волоконною оптикою слід розпочати з ознайомлення з основними законами такого розділу фізики, як оптика.

За своєю природою світло – це електромагнітне випромінювання у певному діапазоні (видимому чи невидимому людським оком). Основними

характеристиками електромагнітного випромінювання прийнято вважати частоту, довжину хвилі та амплітуду (рис. 1.3.).

Частота – число повних циклів електромагнітної хвилі, скоєних за одиницю часу (позначається f , вимірюється Герцах).

Довжина хвилі – відстань між двома найближчими один до одного точками, що коливаються в однакових фазах (позначається λ , лямбда, вимірюється в метрах). Довжина хвилі прямо пов'язана із частотою через швидкість поширення випромінювання. Чим більша частота – тим менша довжина хвилі, і навпаки. Швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вакуумі дорівнює швидкості світла (близько 300 тис. км/с), в інших середовищах ця швидкість менша.

Амплітуда - максимальне відхилення значення електромагнітної хвилі від її середнього значення.

$$c_0 = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{c_0}{f} \Rightarrow f = \frac{c_0}{\lambda}, \quad (1.1)$$

де c_0 - швидкість світла,

λ - довжина хвилі,

f - частота.

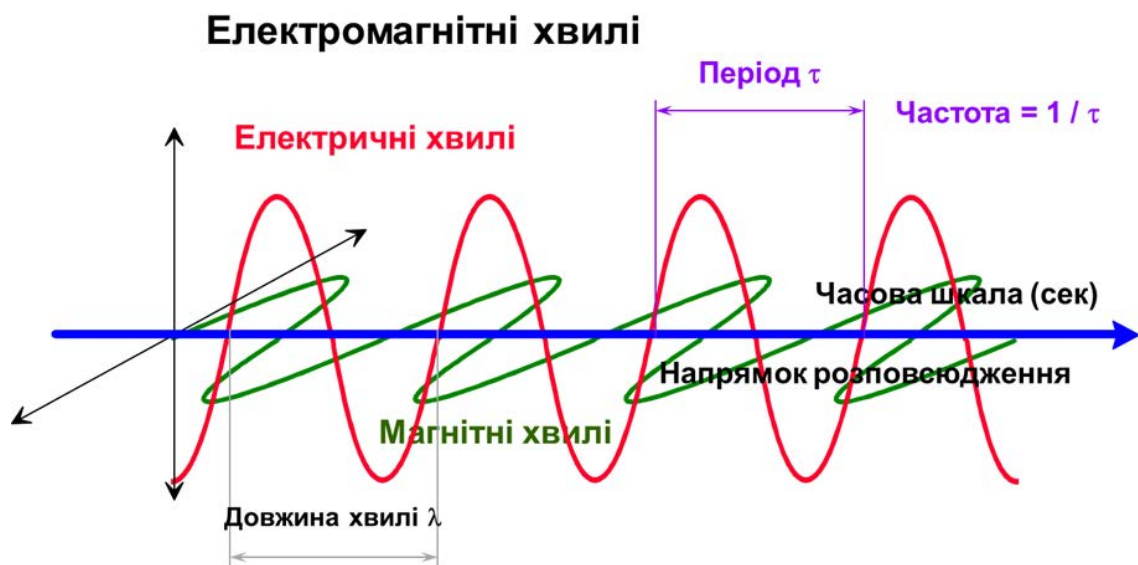


Рис. 1.3. Електромагнітна хвиля.

Електромагнітне випромінювання, залежно від частоти, поділяється на:

- радіохвилі
- мікрохвильове випромінювання
- інфрачервоне випромінювання
- видиме світло
- ультрафіолетове випромінювання
- рентгенівське випромінювання

- гамма-випромінювання

Різні види електромагнітного випромінювання показані на рисунку 1.4.

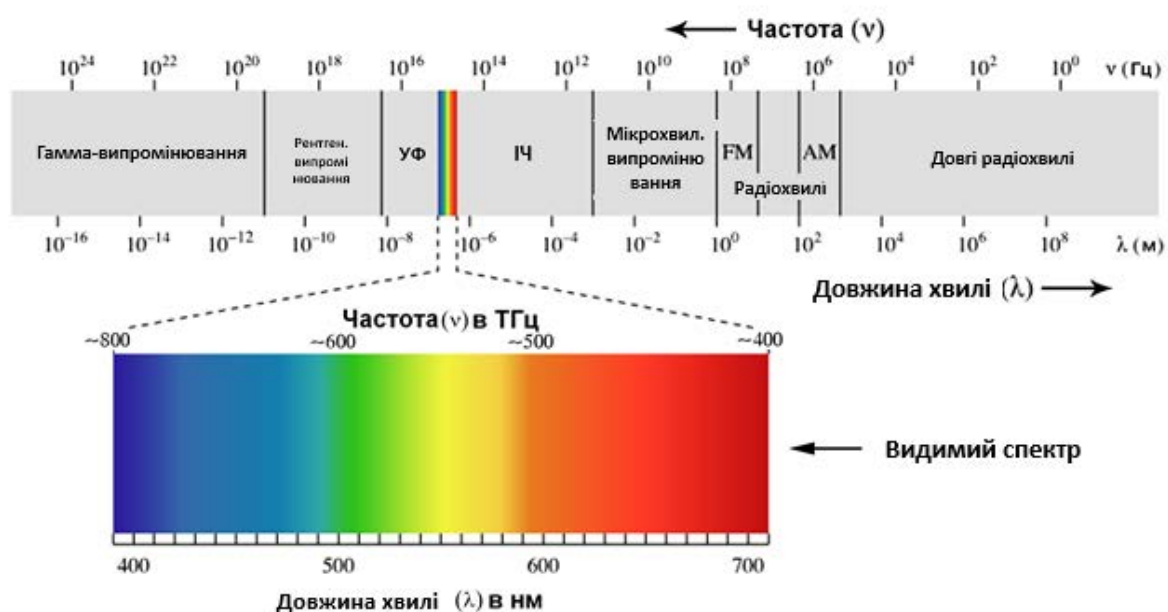
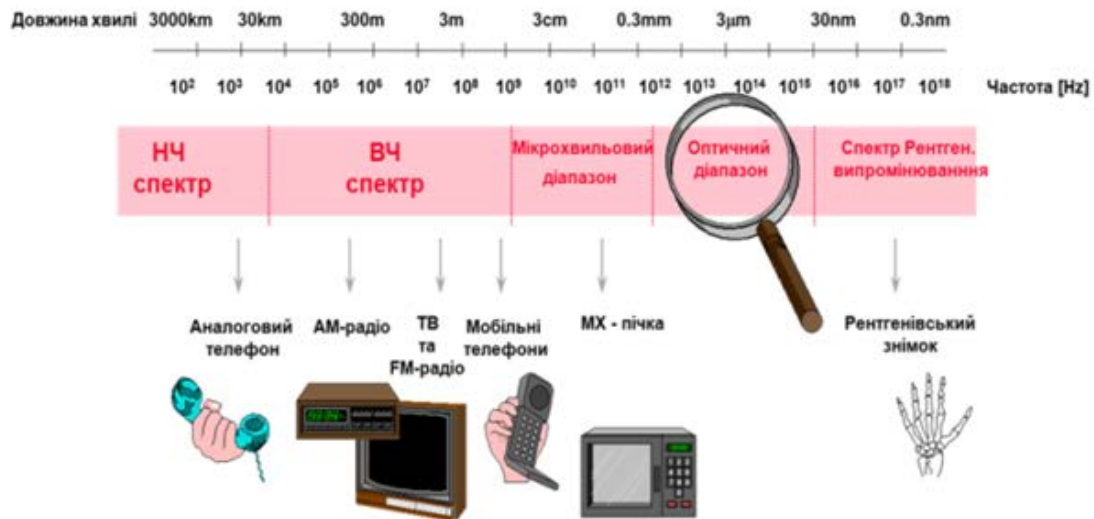


Рис. 1.4. Спектр електромагнітного випромінювання.

А на рис. 1.5. показана шкала довжин хвиль, які використовуються в електромагнітній передачі.

Шкала довжин хвиль, які використовуються в електромагнітній передачі



НЧ спектр - низькочастотний спектр

ВЧ спектр - високочастотний спектр

Рис. 1.5. Шкала довжин хвиль, які використовуються в електромагнітній передачі.

В оптичній передачі даних використовується інфрачервоний діапазон з довжинами хвиль від 850 нм до 1650 нм, що показано на рис. 1.6.

Довжини хвиль, які використовуються у ВО передачі



Рис. 1.6. Довжин хвиль, які використовуються у волоконно-оптичній передачі.

1.2. Заломлення та віддзеркалення світла

При падінні променя світла, на межі розділу двох середовищ (наприклад, повітря і води) можна спостерігати явища заломлення або відбиття, залежно від коефіцієнтів заломлення цих середовищ.

Коефіцієнт заломлення – величина, що дорівнює відношенню швидкостей світла у вакуумі та в даному середовищі (позначається n , це безрозмірна величина). Коефіцієнт заломлення залежить від властивостей середовища розповсюдження та довжини хвилі випромінювання. У вакуумі коефіцієнт заломлення (n) дорівнює 1. Для того, щоб розрахувати коефіцієнт заломлення в конкретній середі розповсюдження необхідно:

$$n = \frac{c_0}{c_n} \quad (1.2)$$

де c_0 - швидкість світла у вакуумі,

c_n - швидкість світла в середі розповсюдження.

Критичний кут – це кут падіння, при якому кут заломлення дорівнює 90° .

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.3)$$

Відбиття світлової хвилі відбувається на межі середовищ із різними коефіцієнтами заломлення. У оптичних волокнах поширення світла пояснюється принципом повного внутрішнього відбиття. Промені в сердцевині волокна (з коефіцієнтом заломлення n_2) постійно відбиваються від межі з оболонкою (з коефіцієнтом заломлення n_1), якщо $n_2 > n_1$. Якщо кут падіння менший за критичний, частина енергії променя заломлюється в оболонку. Якщо кут падіння дорівнює критичному, промінь поширюється вздовж межі. Якщо кут більший за критичний, промінь повністю відбивається і поширюється в сердцевині.

Заломлення – зміна напрямку поширення світлових хвиль, що виникає на межі розділу двох прозорих для цих хвиль середовищ або в товщі середовища з властивостями, що змінюються.

На рис. 1.7. показано відбиття та заломлення променя в оптичному волокні.

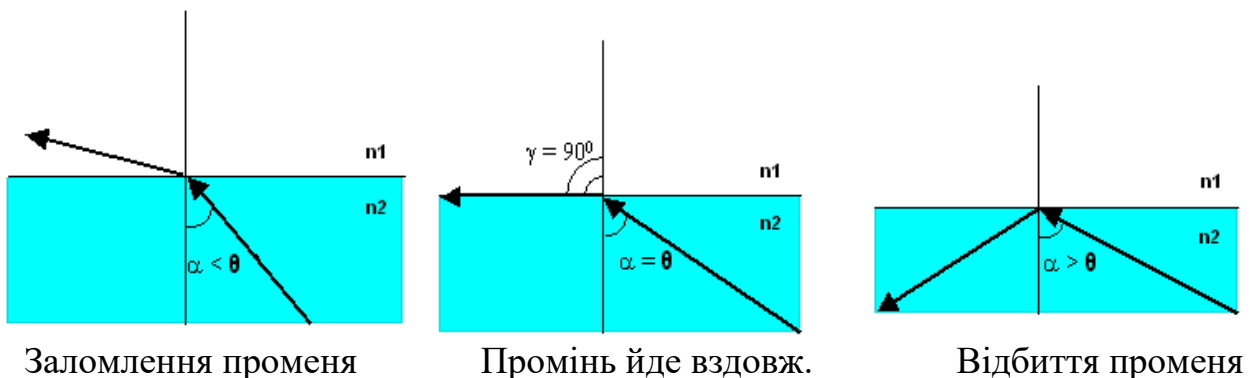


Рис. 1.7. Заломлення та відбиття світла.

1.3. Що таке Децибел (дБ)

Децибел (дБ, міжнародне позначення: dB) – відносна одиниця вимірювання, що використовується для вираження відношення двох фізичних величин (наприклад, потужностей, амплітуд) у логарифмічному масштабі або для вимірювання абсолютних величин відносно опорного рівня. Децибел дорівнює одній десятій бела.

Величина, виражена в децибелах, чисельно дорівнює десяти десятковим логарифмам відношення фізичної величини до однойменної фізичної величини, прийнятої за основу у вигляді шкали, яка показує співвідношення потужності x , співвідношення амплітуд \sqrt{x} , і еквівалентні значення в дБ $10 \log_{10} x$.

$$A_{dB} = 10 \cdot \lg \frac{A}{A_0} \quad \left(A_{dB} = 1 \quad \mapsto \quad \frac{A}{A_0} = 10^{1/10} \approx 1.26 \right) \quad (1.4)$$

де:

A_{dB} – величина у децибелах

A – виміряна фізична величина

A_0 – величина, прийнята за основу.

Співвідношення дБ з потужністю та амплітудою наведено в табл. 1.1.

Табл. 1.1. Співвідношення дБ з потужністю та амплітудою.

дБ	Співвідношення потужності	Співвідношення амплітуди
100	10000000000	100000
90	1000000000	31623
80	100000000	10000
70	10000000	3162
60	1000000	1000
50	100000	316,2
40	10000	100
30	1000	31,62
20	100	10
10	10	3.162
6	3,981 \approx 4	1,995 \approx 2
3	1,995 \approx 2	1,413 \approx $\sqrt{2}$
1	1,259	1,122
0	1	1

-1	0,794	0,891
-3	$0,501 \approx \sqrt[1/2]$	$0,708 \approx \sqrt[1/2]$
-6	$0,251 \approx \sqrt[1/4]$	$0,501 \approx \sqrt[1/2]$
-10	0,1	0,3162
-20	0,01	0,1
-30	0,001	0,03162
-40	0,0001	0,01
-50	0,00001	0,003162
-60	0,000001	0,001
-70	0,0000001	0,0003162
-80	0,00000001	0,0001
-90	0,000000001	0,00003162
-100	0,0000000001	0,00001

Децибел – безрозмірна одиниця, яка не входить до системи SI, але допускається для використання разом із одиницями SI без обмежень. Децибел широко застосовується в радіотехніці, акустиці, оптиці, системах передачі інформації тощо для вимірювання динамічного діапазону, згасання, коефіцієнта підсилення чи шуму. У децибелах заведено вимірювати динамічний діапазон (наприклад, діапазон гучності звучання музичного інструменту), згасання хвилі при поширенні в поглинаючому середовищі, коефіцієнт підсилення і коефіцієнт шуму підсилювача.

Децибелли використовуються не тільки для вимірювання відношення фізичних величин другого порядку (наприклад, потужність, енергія, інтенсивність, щільність потоку потужності, спектральна щільність потужності та ін.) і першого порядку (напруга, сила струму, напруженість поля, звуковий тиск, швидкість руху і щільність електричних зарядів та ін.). У децибелах можна вимірювати відношення будь-яких фізичних величин, а також використовувати перші для подання абсолютних величин.

Загальний коефіцієнт посилення в децибелах із послідовності приладів (таких як підсилювачі і атенуатори) можна обчислити шляхом підсумовування коефіцієнтів посилення окремих компонентів.

Децибел застосовується не лише для порівняння двох величин, але й для вимірювання абсолютних значень. Для цього необхідно чітко визначити, яка саме фізична величина та її опорне значення використовуються як еталон. Опорний рівень позначається додатковим уточненням після символів «дБ» (наприклад, дБм).

У радіо, мікрохвильових та оптоволоконних системах для зручного вимірювання абсолютної потужності використовується спеціальна одиниця. Вона дозволяє компактно виражати широкий діапазон значень потужності:

dBm, dBmW (укр. дБм) – абсолютний рівень потужності в децибелах (dB) відносно 1 мВт (тобто, опорним рівнем є потужність 1 мВт).

$$A_{dB} = 10 \lg A \quad (1.5)$$

де:

A_{dB} – величина у децибелах

A – виміряна потужність у мВт Для більшого розуміння можна навести наступний приклад:

Виміряна потужність оптичного сигналу на виході з оптичного передатчика дорівнює -6 dBm. Скориставшись наведеною вище формулою отримуємо:

$$10 \lg X = -6 \quad (1.6)$$

$$\lg X = -6/10 \quad (1.7)$$

$$\lg X = -0,6 \quad (1.8)$$

$$X = 10^{-0,6} \quad (1.9)$$

$$X = 0,25 \quad (1.10)$$

Бачимо, що -6 dBm орієнтовно дорівнюють 0,25 Вт.

Таким чином, -6 dBm означає потужність, яка у 0,25 рази (або чверть) менша за базову потужність у 1 мВт.

Для більшої зручності можна використовувати наступну таблицю, яка показує орієнтовні значення при переході від dB до разів, де рази можна умовно прирівняти до значень у Вт (це зручно, проте неправильно, бо рази – це безрозмірне співвідношення, а Вати – одиниця потужності). У контексті dBm «рази» стосуються відношення потужності до 1 мВт. Розуміння цих параметрів дуже корисно при розрахунку оптичних бюджетів волоконно-оптичних ліній. В таблиці 1.2. вказані орієнтовні значення при переході від dB до разів.

Табл. 1.2. Орієнтовні значення при переході від dB до разів.

dB	40dB	20dB	10dB	6dB	3dB	1dB	0dB	-1dB	-3dB	-6dB	-10dB	-20dB	40dB
рази	10000	100	10	4	2	1,26	1	0,79	0,5	0,25	0,1	0,01	0,0001

Необхідно запам'ятати, що:

- дБ (децибел) – це відносна величина, яка використовується для оцінки різниці між двома рівнями, наприклад, посилення сигналу або згасання в кабелі.

- дБм (децибел-міліватт) – це абсолютна величина, що виражає потужність сигналу щодо 1 мВт.

-

Використана література для написання розділу [2, 5, 34].

Загальні питання для самоконтролю до розділу.

- Які основні переваги волоконно-оптичного кабелю порівняно з мідним?
- Як швидкість поширення сигналу в оптичному волокні порівнюється зі швидкістю світла у вакуумі?
- Чому волоконно-оптичні лінії зв'язку активно впроваджуються у світі?
- Які фізичні явища використовуються для передачі сигналу в оптичному волокні?
- Що таке заломлення та віддзеркалення світла?
- Як коефіцієнт заломлення впливає на передачу світла у різних середовищах?
- Яке значення має критичний кут при розповсюдженні світла?
- Як децибел використовується для вимірювання параметрів у волоконно-оптичних системах?
- Яке співвідношення потужності виражає рівень -6 dBm?
- В яких галузях використовують децибел як одиницю вимірювання?

2. Оптичне волокно

2.1. Переваги ВОЛЗ

Широка смуга пропускання обумовлена високою частотою оптичного сигналу (порядку 10^{14} Гц у діапазоні 1,55 мкм), що дозволяє передавати по одному волокну потік інформації в кілька терабіт на секунду завдяки сучасним технологіям спектрального ущільнення (WDM). Широка смуга пропускання – це одна з найважливіших переваг оптичного волокна над мідним або будь-яким іншим середовищем передачі інформації.

Окрім того, оптичне волокно має мале згасання світлового сигналу. Сучасне одномодове оптичне волокно має згасання 0,2-0,3 дБ/км на довжині хвилі 1,55 мкм, а в деяких спеціалізованих волокнах цей показник може бути нижчим (до 0,15 дБ/км). Мале згасання та невелика дисперсія дозволяють будувати ділянки ліній без ретрансляції довжиною до 100 км та більше.

Низький рівень шумів у волоконно-оптичних кабелях дозволяє використовувати складні методи модуляції (наприклад, QAM, яка буде розглянута в частині 2 в розділі 1.1 цього посібника), що підвищує пропускну здатність за мінімальної потреби в корекції помилок.

Оскільки волокно виготовлено з діелектричного матеріалу, воно не зазнає впливу електромагнітних перешкод від мідних кабельних систем чи електричного обладнання (ліній електропередач, електродвигунів тощо). У багатоволоконних кабелях також немає проблеми перехресного впливу електромагнітного випромінювання, яке властиве багатопарним мідним кабелям.

Волоконно-оптичні кабелі мають меншу вагу та об'єм у порівнянні з мідними кабелями. Наприклад, 900-парний телефонний кабель діаметром 7,5 см може бути замінений оптичним кабелем діаметром близько 1,5 см (з урахуванням захисних оболонок і броні). При цьому оптичний кабель забезпечує значно більшу пропускну здатність.

Оскільки оптичний кабель практично не випромінює в радіодіапазоні, то інформацію, що передається, складно перехопити без фізичного втручання. Системи моніторингу цілісності оптичної лінії, використовуючи високу чутливість волокна до фізичних впливів, можуть виявляти спроби несанкціонованого доступу та сигналізувати про них. Сенсорні системи, що використовують інтерференційні ефекти світлових сигналів, що поширюються (як по різних волокнах, так і різної поляризації) мають дуже високу чутливість до коливань та невеликих перепадів тиску. Такі системи особливо необхідні для створення ліній зв'язку в урядових, банківських та деяких інших спеціальних службах, що висувають підвищені вимоги до захисту даних.

Оптичне волокно, як діелектрик, усуває проблему електричних контурів заземлення, які можуть виникати в мідних кабелях при підключенні пристроїв із різними точками заземлення, запобігаючи пошкодженню обладнання.

Завдяки відсутності електричного струму та іскроутворення оптичне волокно підвищує безпеку на об'єктах із високим ризиком (хімічні, нафтопереробні підприємства).

Оптичне волокно виготовляється з кварцу (двоокису кремнію), який є доступним матеріалом. У порівнянні з мідними кабелями, ВОК дозволяє зменшити витрати завдяки передачі сигналів на більші відстані без повторювачів.

Завдяки сучасним технологіям виробництва оптичних волокон деградація матеріалу значно сповільнена, що забезпечує термін служби кабелю до 25–40 років за належних умов експлуатації. За цей час може змінитися кілька поколінь/стандартів приймально-передаючих систем, але кабель буде той самий.

Оптичне волокно не проводить електричний струм, але в разі потреби віддаленого (дистанційного) електроживлення можна використовувати гібридні кабелі, що поєднують оптичні волокна з мідними провідниками.

2.2. Недоліки ВОЛЗ

Для роботи оптичних ліній зв'язку електричні сигнали необхідно перетворювати на оптичні та навпаки. Оптичні передавачі та приймачі залишаються дорогими через складність їх виробництва. Крім того, потрібне надійне пасивне комутаційне обладнання, зокрема оптичні з'єднувачі з низькими втратами та високим ресурсом на підключення-відключення, розгалужувачі, атенюатори тощо.

Монтаж, тестування та обслуговування волоконно-оптичних ліній зв'язку є витратними процесами через потребу в спеціалізованому обладнанні та кваліфікованих фахівцях. У разі пошкодження ВОК необхідно проводити зварювання волокон у місці розриву та захищати цю ділянку від впливу зовнішнього середовища.

Оптичне волокно теоретично є дуже міцним, оскільки скло як матеріал має межу міцності на розрив вище 1 ГПа (10^9 Н/м²). Наприклад, волокно діаметром 125 мкм в ідеальних умовах може витримати вагу до 1 кг. Однак на практиці мікротріщини знижують його міцність, що робить волокно вразливим до розривів. Для підвищення надійності волокно покривають захисним лаком на основі епоксикарилату, а кабель зміцнюють кевларовими нитками, сталевими тросами або склопластиковими стрижнями. Такі заходи підвищують надійність, але збільшують вартість, вагу та габарити оптичного кабелю.

2.3. Основні параметри оптичного волокна та розповсюдження світла по волокну

Основними чинниками, що впливають на характер поширення світла у волокну, окрім довжини хвилі випромінювання, є:

- згасання;
- геометричні параметри волокна;

- дисперсія.

2.3.1. Згасання

Згасання світла у волокні зумовлене втратами на поглинання, розсіювання та кабельними втратами (рис. 2.3.1.1). Втрати на поглинання та розсіювання називають власними втратами, тоді як кабельні втрати за своєю природою є додатковими.

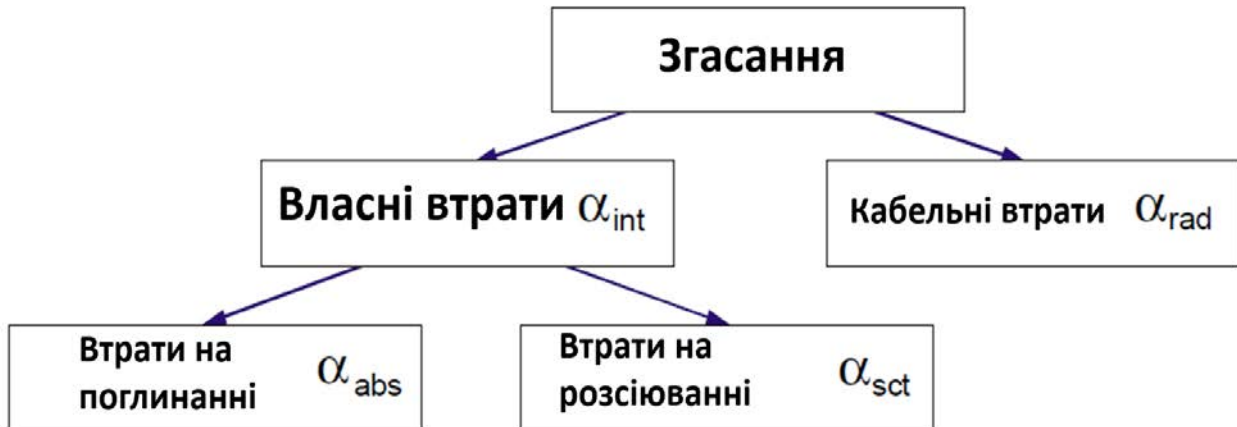


Рис. 2.1. Основні типи втрат у волокні

Повне згасання у волокні (вимірюється у дБ/км) визначається у вигляді суми:

$$\alpha = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{rad}} = \alpha_{\text{abs}} + \alpha_{\text{sct}} + \alpha_{\text{rad}} \quad (2.1)$$

Втрати на поглинання (α_{abs}) включають внутрішнє поглинання кварцового скла (в ультрафіолетовій та інфрачервоній областях) і поглинання світла домішками. Домішкові центри, залежно від типу домішки, поглинають світло на певних довжинах хвиль, розсіюючи енергію у вигляді джоулевого тепла. Навіть незначні концентрації домішок призводять до появи піків на кривій втрат. Власні втрати на поглинанні зростають і стають значними в ультрафіолетовій та інфрачервоній областях. При довжині хвилі випромінювання вище 1600 нм звичайне кварцове скло стає непрозорим через зростання втрат, пов'язаних з інфрачервоним поглинанням.

Втрати на розсіювання (α_{sct}). Починаючи з 1970-х років, оптичне волокно досягло високої чистоти (99,9999%), що значно знизило вплив домішок на згасання. На довжині хвилі 800 нм згасання становило близько 1,5 дБ/км. Основним фактором втрат стало релієвське розсіювання, викликане мікроскопічними неоднорідностями у структурі волокна, які виникають під час його виготовлення. Ці неоднорідності розсіюють світло в усіх напрямках, що

призводить до його часткової втрати, зокрема в оболонці волокна та навколишньому середовищі.

На рис. 2.2. наводиться загальний вигляд спектральної залежності власних втрат для сучасних одномодових та багатомодових волокон.

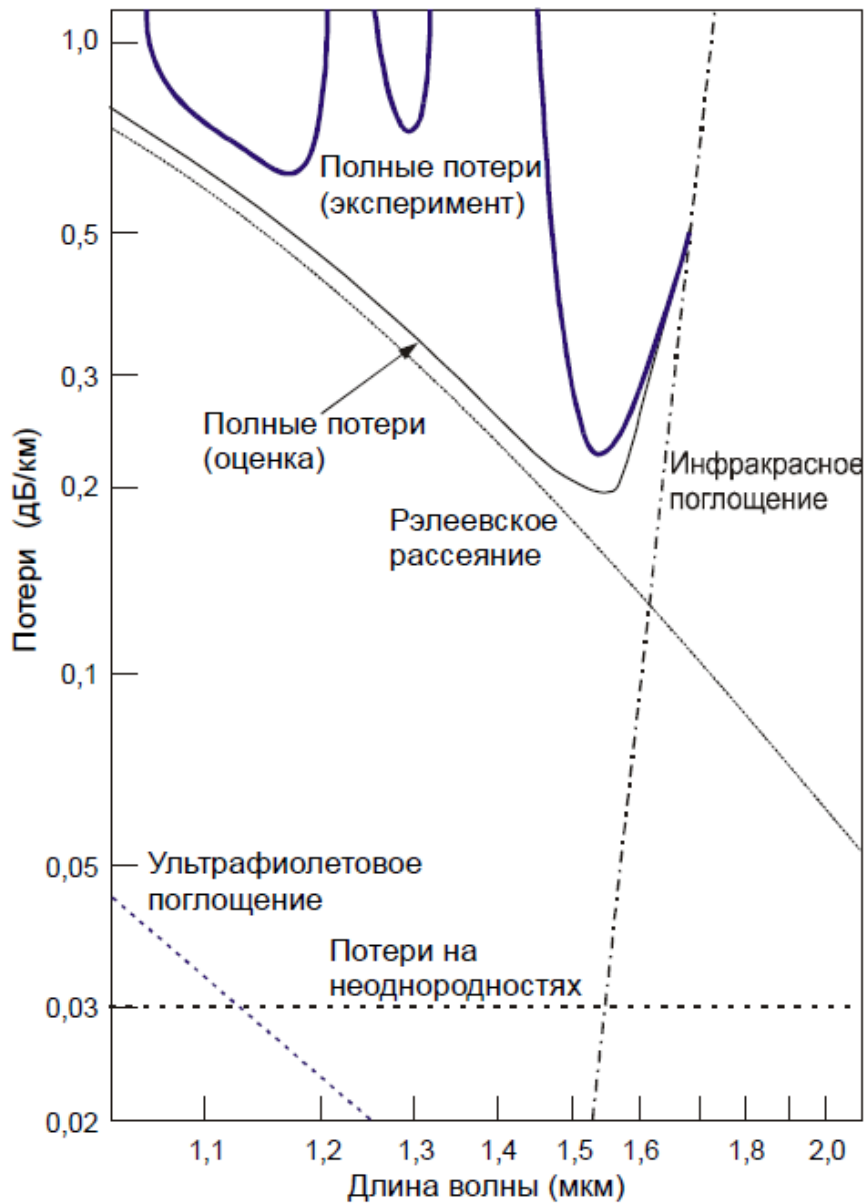


Рис. 2.2. Фактори, що впливають на згасання

Вікно прозорості (англ. Transmission Window) - це діапазон довжин хвиль, у якому згасання оптичного сигналу в волокні є мінімальним. Оптичне волокно має три основні вікна прозорості: 850 нм, 1310 нм і 1550 нм (рис. 2.3.). Найменше згасання (0,22 дБ/км) спостерігається на 1550 нм, що робить це вікно оптимальним для передачі на великі відстані. На 1310 нм згасання вище, але дисперсія близька до нуля, що підходить для міських і зональних мереж. Перше вікно (850 нм) використовується в офісних мережах із багатомодовими

волокнами. Сучасні волокна також можуть мати розширені діапазони прозорості, наприклад, у ближньому та середньому інфрачервоному діапазонах. Нерівномірність згасання світла в оптичному волокні в різних діапазонах довжин хвиль зумовлена недосконалістю середовища, наявністю домішок, що резонують на різних частотах.



Рис. 2.3. Характеристика згасання оптичного волокна (вікна прозорості оптичного волокна)

Втрати на вигинах (α_{rad}). Кабельні втрати, або втрати на вигинах, зумовлені скручуванням, деформаціями та вигинами волокон під час виробництва кабелю, нанесення покриттів або прокладання волоконно-оптичного кабелю (ВОК). За дотримання технічних умов на прокладання кабелю ці втрати зазвичай становлять близько 20% від повного згасання. Додаткові втрати виникають, якщо радіус вигину кабелю менший за мінімально допустимий, зазначений у специфікації ВОК.

На рис. 2.4. показана деформація сигналу при передачі на велику відстань



Рис. 2.4. Деформація сигналу при передачі на велику відстань.

2.3.2. Геометричні параметри волокна

Оптичні волокна поділяються на дві основні групи: багатомодові (MMF, Multimode Fiber) та одномодові (SMF, Singlemode Fiber).

Для початку треба дати визначення, що таке мода, одномодові та багатомодові волокна.

«Мода» (або мод світла) – це окремий шлях або спосіб поширення світлового променя всередині волокна, який визначається його геометрією та показниками заломлення. Кожна мода характеризується певним кутом входження світла та розподілом енергії в поперечному перерізі волокна. У багатомодових волокнах існує багато мод через більший діаметр серцевини, що призводить до розсіювання та спотворення сигналу на великих відстанях. У одномодових волокнах підтримується лише одна мода, що забезпечує мінімальні спотворення та дозволяє передачу на великі відстані. Кількість мод залежить від співвідношення діаметра серцевини до довжини хвилі світла.

Одномодові оптичні волокна – це тип оптичного волокна, яке передає лише одну мод світла завдяки малій різниці показників заломлення та меншому діаметру серцевини (зазвичай 8-10 мкм). Воно призначене для довгих відстаней (десятки чи сотні кілометрів) і високошвидкісної передачі даних, наприклад, у магістральних мережах.

Багатомодові оптичні волокна – це тип оптичного волокна, яке дозволяє передавати кілька мод світла одночасно через велику різницю між показниками заломлення серцевини та оболонки. Воно має більший діаметр серцевини (зазвичай 50 або 62.5 мкм) і використовується для коротких відстаней (до кількох кілометрів), наприклад, у локальних мережах.

Багатомодові волокна поділяються на ступінчасті (step-index) і градієнтні (graded-index).

Ступінчастий профіль волокна – це тип оптичного волокна, де показник заломлення різко змінюється на межі між серцевиною та оболонкою, утворюючи чіткий перепад. Такий профіль характерний для багатьох одномодових і деяких багатомодових волокон, забезпечуючи просте виготовлення, але може спричинити більші втрати через відбиття на межі.

Градiєнтний профiль волокна – це тип оптичного волокна, де показник заломлення плавно зменшується вiд центра серцевини до її краю. Такий профiль дозволяє свiтлу рухатися по параболiчнiй траєкторiї, зменшуючи дисперсiю та пiдвищуючи пропускну здатнiсть, що типово для багатомодових волокон iз високою продуктивнiстю.

Вiдносна рiзниця показникiв заломлення. Волокно складається з серцевини та оболонки. Оболонка оточує оптично бiльш щiльну серцевину, що є свiтлонесучою частиною волокна, Рис. 15. Позначимо через n_1 та n_2 показники заломлення серцевини та оболонки, вiдповiдно n_1 – показник заломлення серцевини, n_2 - оболонки. Один з важливих параметрiв, що характеризує волокно, це вiдносна рiзниця показникiв заломлення:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (2.2)$$

Числова апертура. Важливим параметром, що характеризує волокно, є числова апертура NA. Числова апертура (NA) визначає кут, пiд яким волокно може приймати свiтло. Для волокна зi ступiнчастим профiлем легко отримати значення числової апертури, виражене через показники заломлення:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.3)$$

Нормована частота. Iншим важливим параметром, що характеризує волокно i свiтло, що по ньому поширюється, є нормована частота V. Нормована частота V характеризує кiлькiсть мод, якi можуть поширюватися у волокнi i визначається як

$$V = \pi d \cdot \frac{NA}{\lambda} \quad (2.4)$$

де d - дiаметр серцевини волокна.

Кiлькiсть мод. Залежить вiд нормованої частоти (а та, у свою чергу вiд дiаметра серцевини, числової апертури та довжини хвилi). При $V < 2,405$ може поширюватися тiльки одна мода, а зi зростанням V кiлькiсть мод починає рiзко зростати.

За бiльших значень V кiлькiсть мод N_m для ступiнчастого волокна можна оцiнити за формулою:

$$N_m = \frac{1}{2} V^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d}{\lambda} NA \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (2.5)$$

На рис. 2.5. показана загальна картина поширення свiтла в рiзних типах оптичних волокон: багатомодового ступiнчастого, багатомодового градiєнтного, i одномодового ступiнчастого волокна.

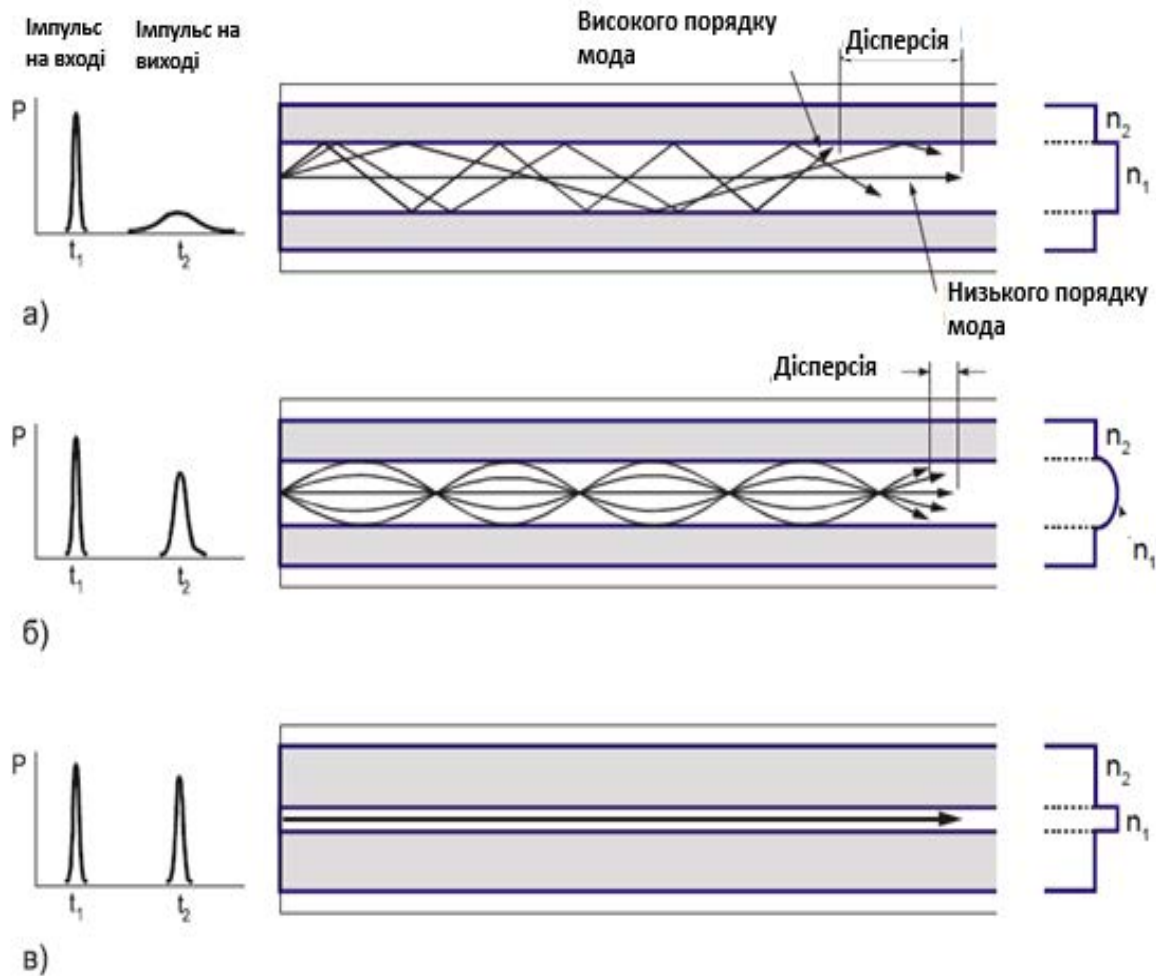


Рис. 2.5. Поширення світла в різних типах оптичних волокон: а) багатомодове ступінчасте волокно; б) багатомодове градієнтне волокно; в) одномодове ступінчасте волокно.

Довжина хвилі відсічення – мінімальна довжина хвилі, при якій волокно підтримує тільки одну моду, що поширюється, називається довжиною хвилі відсічення. Цей параметр притаманний для одномодового волокна. Якщо робоча довжина хвилі менша за довжину хвилі відсічення, то має місце багатомодовий режим поширення світла.

Розрізняють волоконну довжину хвилі відсічення (λ_{CF}) та кабельну довжину хвилі відсічення (λ_{CCF}). Перша відповідає слабко напруженому волокну. Насправді ж волокно розташоване в кабелі, який зазнає численних вигинів під час прокладання. Тому, з практичної точки зору кабельна довжина хвилі відсічення становить більший інтерес.

Волоконну довжину хвилі відсічення можна оцінити як теоретично, так і експериментально. Теоретично легко це зробити для ступінчастого одномодового волокна:

$$\lambda_{CF} = \pi d \frac{NA}{2,405} = 1,847 \cdot dn_1 \sqrt{\Delta} \quad (2.6)$$

λ_{CCF} , на відміну від λ_{CF} , можна оцінити лише експериментальним чином. Одним із практичних методів вимірювання довжини хвилі відсічення є метод переданої потужності. Вимірюють спектральну потужність, передану через одномодове волокно довжиною 2 м, залежно від довжини хвилі. Отримані дані порівнюють із аналогічним параметром для багатомодового волокна. Будується крива:

$$A_m(\lambda) = 10 \lg \frac{P_s(\lambda)}{P_M(\lambda)} \quad (2.7)$$

де P_s - потужність на виході одномодового волокна; P_M - потужність на виході багатомодового волокна.

Багатомодове волокно є еталонним. При цьому одне і те саме джерело випромінювання з довжиною хвилі, що переналаштовується, використовується як для одномодового, так і багатомодового волокна. Будується крива, Рис. 2.6., довгохвильова ділянка якої екстраполюється прямою (1), яка апроксимує залежність потужності від довжини хвилі. Будується паралельна пряма (2), віддалена нижче (1) на 0,1 дБ. Точка перетину прямої (2) з кривою А відповідає довжині хвилі відсічення.

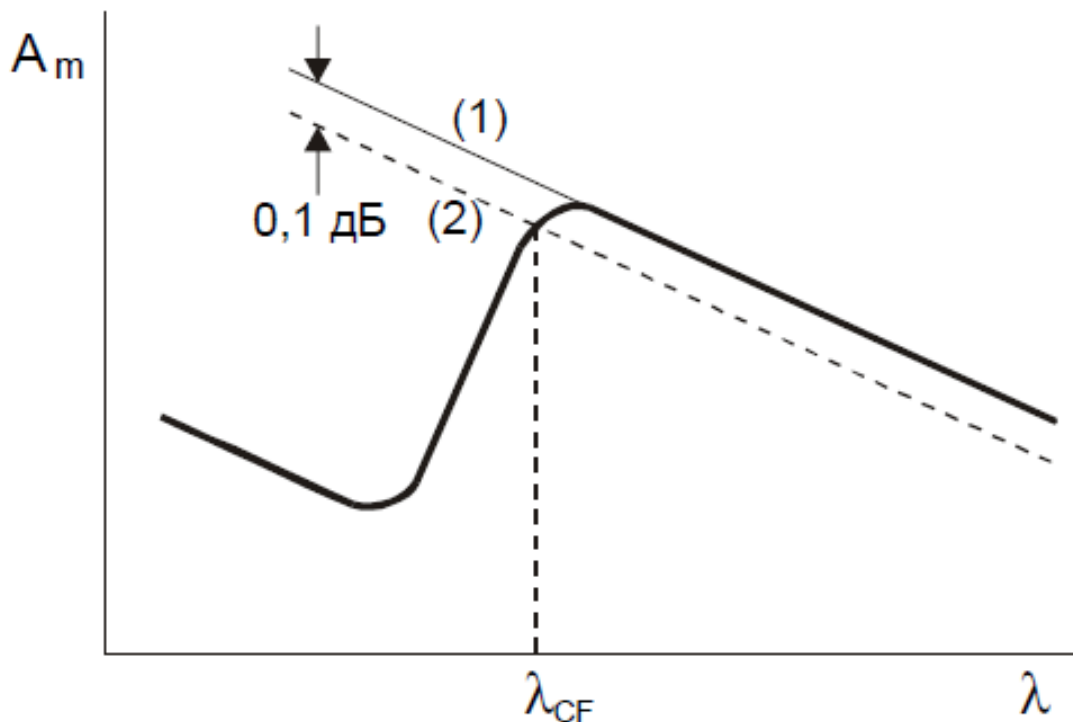


Рис. 2.6. Визначення довжини хвилі відсічення

Реальну різницю між одномодовими та багатомодовими волокнами можна побачити на рисунку 2.7.

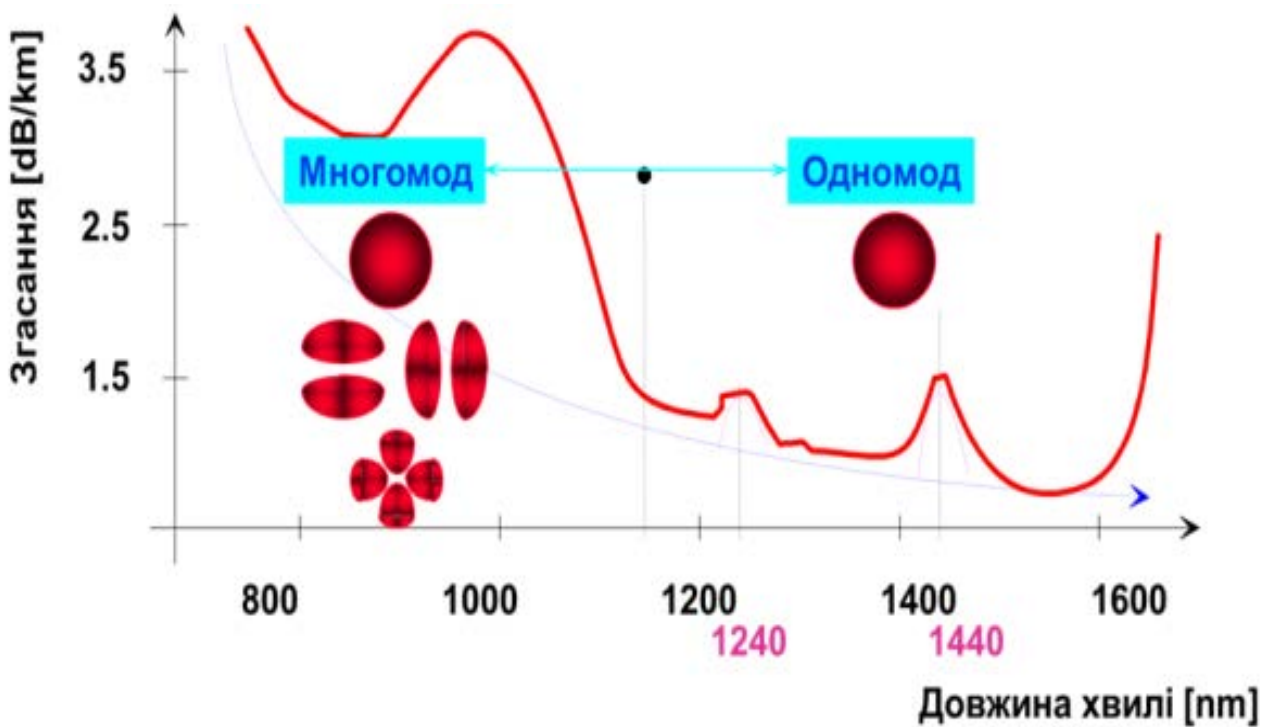


Рис. 2.8. Моді в оптичних волокнах.

2.3.3. Дисперсія

По оптичному волокну передається не просто світлова енергія, але й корисний інформаційний сигнал. Імпульси світла, послідовність яких визначає інформаційний потік, у процесі розповсюдження розпливаються. При досить великому розширенні імпульси починають перекриватися, тому стає неможливим їх виділення на стороні прийому.

Дисперсія – це розширення імпульсів, яке має розмірність часу і визначається як квадратична різниця тривалостей імпульсів на виході та вході кабелю довжини L за формулою:

$$\tau(L) = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2} \quad (2.8)$$

Зазвичай дисперсія нормується для 1 км, і вимірюється в пс/км. Дисперсія в загальному випадку характеризується трьома основними факторами, що розглядаються нижче:

- відмінністю швидкостей поширення напрямних мод (міжмодовою дисперсією τ_{mod}),
- напрямними властивостями світловодної структури (хвильова водна дисперсія τ_w),
- властивостями матеріалу оптичного волокна (матеріальною дисперсією τ_{mat}).

На рис. 2.3.3.1. показані види дисперсії.

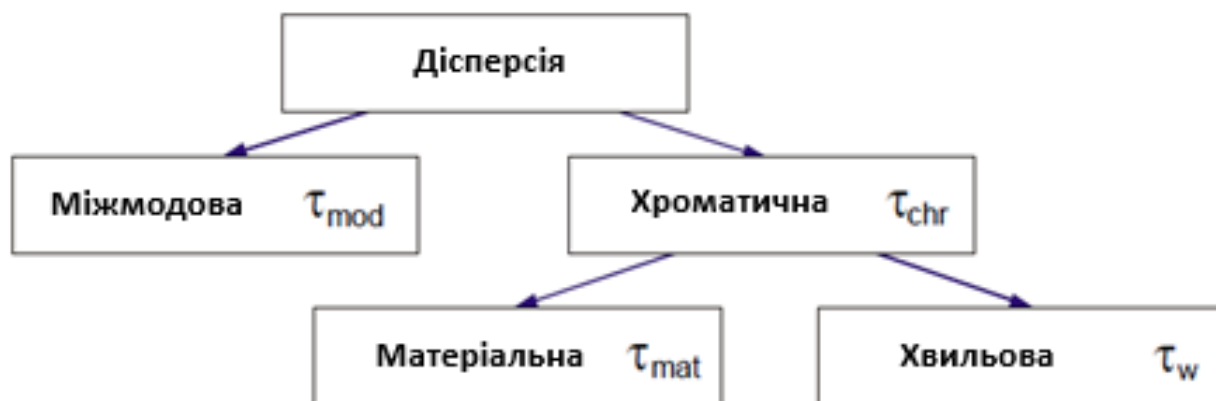


Рис. 2.9. Види дисперсії.

Що менше значення дисперсії, то більший потік інформації можна передати по волокну. Результуюча дисперсія визначається за формулою:

$$\tau^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{chr}}^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + (\tau_{\text{mat}} + \tau_w)^2 \quad (2.9)$$

Міжмодова дисперсія виникає внаслідок різної швидкості розповсюдження у кожній з мод і має місце тільки в багатомодовому волокні.

Насправді, особливо в описі багатомодового волокна, частіше користуються терміном смуга пропускання. При розрахунку смуги пропускання W можна скористатися формулою:

$$W = \frac{0,44}{\tau} \quad (2.10)$$

Вимірюється смуга пропускання МГц·км. Насправді, МГц·км – це специфічна одиниця для характеристики багатомодового оптичного волокна, яка відображає здатність передавати сигнал на певну відстань без значних втрат якості. З визначення смуги пропускання видно, що дисперсія накладає обмеження на дальність передачі і верхню частоту сигналів, що передаються. Показник смуги пропускання на одиницю довжини. Наприклад, якщо волокно має смугу пропускання 500 МГц·км, то на довжині 1 км можна передати сигнал з частотою до 500 МГц. Але при збільшенні довжини волокна максимально можлива частота зменшується: для 2 км це буде вже 250 МГц (за умови лінійної залежності).

Фізичний сенс W (смуга пропускання) – це максимальна частота модуляції, яку можна передати на певну довжину волокна без значного викривлення сигналу, спричиненого дисперсією. Фактично W (смуга пропускання) – це добуток максимальної модуляційної частоти та довжини каналу, а не частота для 1 км.

Якщо дисперсія лінійно зростає зі зростанням відстані, то смуга пропускання залежить від відстані обернено пропорційно.

Хроматична дисперсія складається з матеріальної та хвильової складових і має місце при поширенні як в одномодовому, так і багатомодовому

волокні. Однак найвиразніше вона проявляється в одномодовому волокні через відсутність міжмодової дисперсії.

Матеріальна дисперсія обумовлена залежністю показника заломлення волокна від довжини хвилі.

2.4. Типи оптичних волокон

Як згадувалось вище, оптичні волокна поділяються на дві основні групи: багатомодові (MMF, Multimode Fiber) та одномодові (SMF, Singlemode Fiber).

Багатомодові волокна поділяються на ступінчасті (step-index) і градієнтні (graded-index).

Одномодові волокна включають стандартні (SMF, G.652), волокна зі зміщеною дисперсією (DSF, G.653) і волокна з ненульовою зміщеною дисперсією (NZDSF, G.655).

Типи та розміри волокон наведено на Рис. 12. Кожне оптичне волокно складається з серцевини та оболонки з різними показниками заломлення. Серцевина, через яку поширюється світловий сигнал, виготовляється з оптично щільнішого матеріалу. Волокна відрізняються діаметром серцевини та оболонки, а також профілем показника заломлення серцевини. У позначенні волокон через дріб вказують діаметри серцевини та оболонки (наприклад, 50/125 мкм або 9/125 мкм). У багатомодових градієнтних волокнах і одномодових волокнах зі зміщеною дисперсією показник заломлення серцевини змінюється залежно від радіуса (зазвичай параболічно), що забезпечує кращі технічні характеристики або для досягнення спеціальних характеристик волокна.

Порівняння багатомодових волокон показує, що градієнтні волокна мають нижчу міжмодову дисперсію порівняно зі ступінчастими завдяки параболічному профілю показника заломлення, що забезпечує вищу пропускну здатність. Одномодові волокна, з діаметром серцевини 8–10 мкм, усувають міжмодову дисперсію, що значно підвищує їхню пропускну здатність. На рис. 2.10. показані типи оптичних волокон.

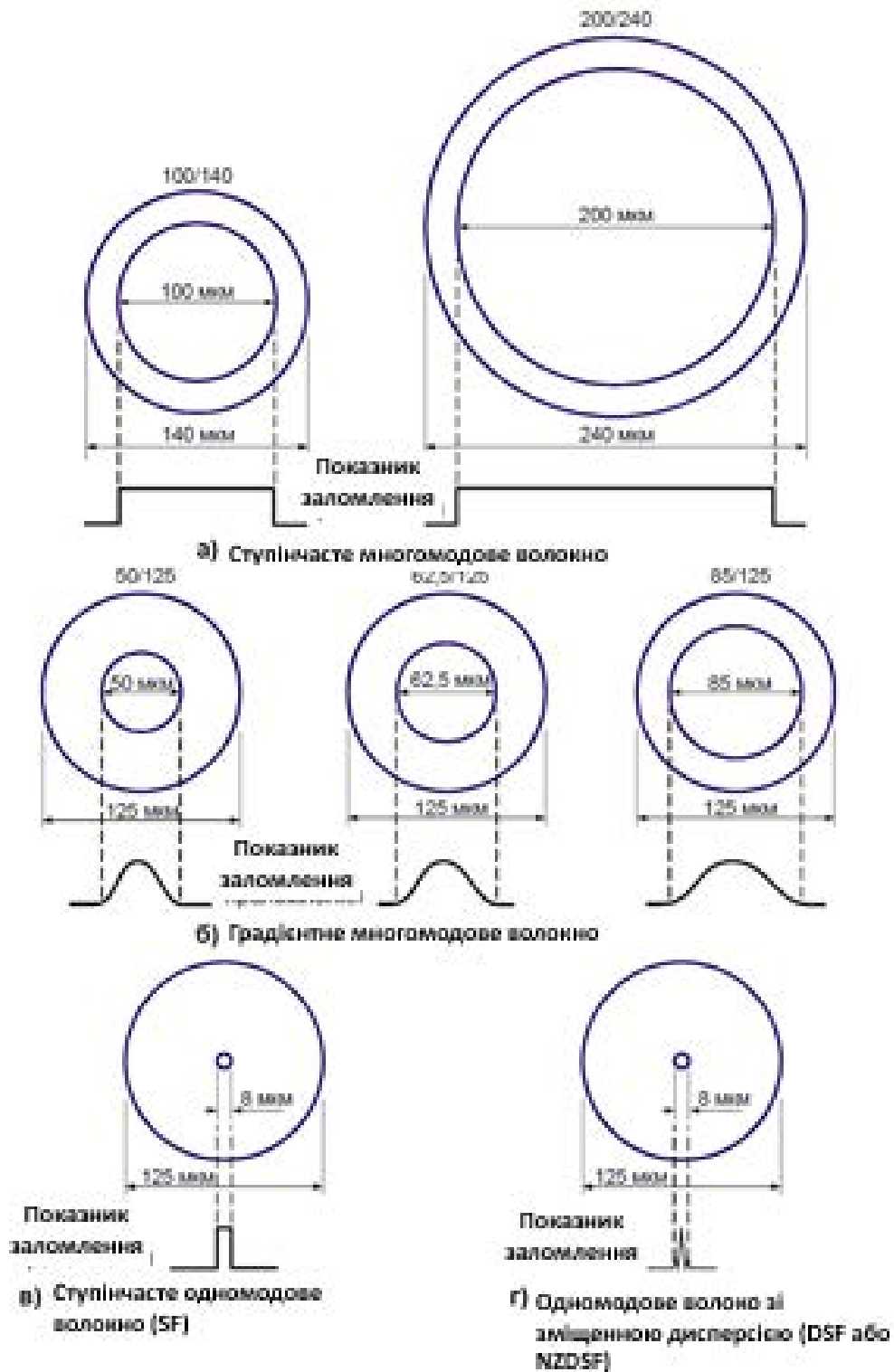


Рис. 2.1.0 Типи оптичних волокон

Більшість пристроїв волоконної оптики працюють у інфрачервоному діапазоні 850–1650 нм, переважно у трьох вікнах прозорості, про які згадувалось вище 850, 1310 і 1550 нм і які відповідають локальним мінімумам згасання сигналу та забезпечують велику дальність передачі (особливо 1310 та 1550 нм).

Багатомодові градієнтні волокна

У стандартному багатомодовому (ММ або ММF) градієнтному волокні (50/125 або 62,5/125) діаметр світлонесучої серцевини 50 і 62,5 мкм, що на порядок більше довжини хвилі передачі. Це призводить до поширення безлічі різних типів світлових променів – мод (рис. 2.11.). Два вікна прозорості 850 і 1300 нм зазвичай використовують для передачі світла багатомодовим волокном.

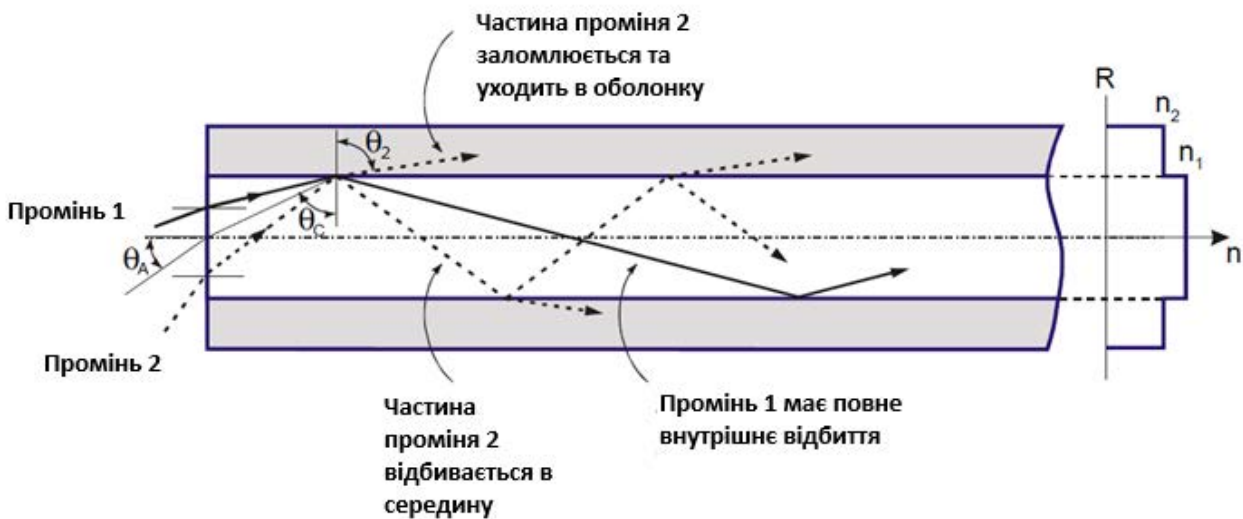


Рис. 2.11 Хід променів у багатомодовому оптичному волокні зі ступінчастим профілем.

На сьогоднішній день використовуються наступні типи багатомодових оптичних волокон: OM1, OM2, OM3, OM4 та OM5:

OM1 має розмір серцевини 62,5 мкм. Може підтримувати 10 Gigabit Ethernet на відстані до 33 метрів. Найчастіше використовується для додатків Ethernet 100 Мбіт/с.

- Діаметр сердечника: 62,5/125 мкм.
- Тип передачі: багатомодовий (MMF - Multimode Fiber).
- Довжина хвилі: підтримує довжини хвиль 850 нм і 1300 (1310) нм.
- Максимальна довжина при 1 Гбіт/с: До 275 метрів.
- Типова область використання: системи локальних мереж (LAN), що вимагають низької пропускної здатності.
- Колір патчкордової оболонки: помаранчевий.

OM2 з меншим розміром серцевини 50 мкм. Підтримує до 10 Gigabit Ethernet на довжині до 82 метрів, але частіше використовується для швидкостей 1 Gigabit Ethernet.

- Діаметр сердечника: 50/125 мкм.
- Тип передачі: багатомодовий.
- Довжина хвилі: також підтримує 850 нм і 1300 (1310) нм.
- Максимальна довжина при 1 Гбіт/с: до 550 метрів.
- Типова область використання: системи середньої пропускнуої здатності, такі як корпоративні мережі.
- Колір патчкордової оболонки: помаранчевий.

OM3 розмір сердцевини становить 50 мкм, але кабель оптимізовано для лазерного джерела випромінювання на відміну від двох попередніх. OM3 підтримує 10 Gigabit Ethernet на відстані до 300 метрів. Крім того, OM3 здатне підтримувати 40 Gigabit і 100 Gigabit Ethernet на відстані до 100 метрів, однак найчастіше використовується 10 Gigabit Ethernet.

- Діаметр сердечника: 50/125 мкм.
- Тип передачі: багатомодовий, оптимізований для лазерів.
- Довжина хвилі: підтримує 850 нм і 1300 (1310) нм.
- Максимальна довжина при 10 Гбіт/с: до 300 метрів.
- Типова область використання: високошвидкісні мережі, дата-центри, Ethernet на основі 10GbE.
- Колір патчкордової оболонки: бірюзовий.

OM4 повністю сумісне з волокном OM3. Волокно OM4 було розроблено спеціально для лазерів. Цей тип волокна забезпечує відстань зв'язку 10 Гбіт/с до 550 м порівняно з 300 м в OM3. Також цей тип волокна підтримує роботу 40/100 Гбіт/с на відстані до 150 метрів за допомогою роз'єму MPO.

- Діаметр сердечника: 50/125 мкм.
- Тип передачі: багатомодовий, вдосконалений для ще більшої швидкості.
- Довжина хвилі: 850 нм і 1300 (1310) нм.
- Максимальна довжина при 10 Гбіт/с: до 550 метрів; при 40/100 Гбіт/с - до 150 метрів.
- Типова область використання: високошвидкісні Ethernet-мережі, більш масштабні дата-центри.
- Колір патчкордової оболонки: бірюзовий.

OM5 також відоме як WBMMF (широкосмугове багатомодове волокно), є найновішим типом багатомодового волокна, яке має зворотну сумісність з OM4. Має такий самий розмір сердцевини, як OM2, OM3 і OM4. Розроблено і специфіковано для підтримки щонайменше чотирьох каналів WDM з мінімальною швидкістю 28 Гбіт/с на канал у вікні 850-953 нм.

- Діаметр сердечника: 50/125 мкм.
- Тип передачі: багатомодовий, розроблений для короткохвильової передачі (SWDM).
- Довжина хвилі: підтримує широкий діапазон від 850, 950 і 1300 (1310) нм.
- Максимальна довжина при 100 Гбіт/с: до 150 метрів.

- Типова область використання: підтримка передачі кількох довжин хвиль через одне волокно, що робить його ідеальним для сучасних високошвидкісних мереж.

- Колір патчкордової оболонки: лаймовий зелений.

Основні характеристики стандартів оптичних багатомодових волокон OM1, OM2, OM3, OM4 та OM5 наведені в таблиці 2.1.

Табл. 2.1. Основні характеристики стандартів оптичних багатомодових волокон OM1, OM2, OM3, OM4 та OM5.

Стандарт	Діаметр сердечника	Максимальна довжина передачі	Пропускна здатність	Джерело сигналу	Колір патчкордової оболонки
OM1	62,5/125 мкм	До 275 м	До 100 Мбіт/с	Світлодіод	Помаранчевий
OM2	50/125 мкм	До 550 м	До 1 Гбіт/с	Світлодіод	Помаранчевий
OM3	50/125 мкм	До 300 м	До 10 Гбіт/с	Лазер	Бірюзовий
		До 100 м	До 40/100 Гбіт/с		
OM4	50/125 мкм	До до 550 м	До 10 Гбіт/с	Лазер	Бірюзовий
		До 150 м	До 40/100 Гбіт/с		
OM5	50/125 мкм	До 150 м	До 100 Гбіт/с	Лазер	Лаймовий зелений

В таблиці 2.2. наведені відстані максимальної роботи обладнання по різних типах оптичних волокон в залежності від швидкості передачі даних.

Табл. 2.2. Відстані максимальної роботи обладнання по різних типах оптичних волокон в залежності від швидкості передачі даних.

Тип багатомодового волокна	Fast Ethernet (100 Мбіт/с)	1GbE (1000Гбіт/с)	10 Гбіт/с	40 Гбіт/с	100 Гбіт/с
OM1	2000m	275m	33m	/	/
OM2	2000m	550m	82m	/	/
OM3	2000m	/	300m	100m	70m
OM4	2000m	/	550m	150m	150m
OM5	/	/	550m	150m	150m

Одномодові волокна

Всі основні типи одномодових оптичних волокон (ООВ), їх параметри і характеристики описані в двох групах стандартів. По-перше, в стандартах Міжнародної Електротехнічної Комісії (IEC) серії IEC 60793-1, а також у Рекомендаціях Сектора Стандартизації Телекомунікацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку (ITU-T) серії G.65x. Ми не будемо розглядати положення першої групи стандартів, тому що ООВ розглядаються там більшою мірою як електротехнічні вироби, в той час як в документах ITU-T простежується ставлення до ООВ як до прямої системи для передачі інформації. До таких документів зокрема відносяться сьомі Рекомендації ITU-T (табл. 2.3.).

Табл. 2.3. Рекомендації ITU-T та їх номери, що описують одномодові волокна

G.652	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю
G.653	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю зі зміщеною дисперсією
G.654	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю зі зміщеною довжиною хвилі відсічення

G.655	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю з ненульовою зміщеною дисперсією
G.656	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю з ненульовою дисперсією для широкосмугових транспортних мереж
G.657	Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю, що не чутливий до втрат на макрозгинах, для використання в мережах доступу

На теперішній час затверджені наступні спектральні діапазони в інтервалі 1260 - 1675 нм (табл. 2.4.).

Табл. 2.4. Діапазони, використовувані для передачі сигналів по одномодовим оптичним волокнам відповідно до Рекомендацій ІТУ-Т серії G.

Позначення	Діапазон, нм	Найменування (укр.)	Найменування (англ)
O	1260...1360	Основний	Original
E	1360...1460	Розширений	Extended
S	1460...1530	Короткохвильовий	Short wavelength
C	1530...1565	Стандартний	Conventional
L	1565...1625	Довгохвильовий	Long wavelength
U	1625...1675	Наддовгохвильовий	Ultra-long wavelength

Спектральні діапазони в інтервалі 1260 - 1675 нм, які використовуються в волоконно-оптичній передачі наведені на рис. рис. 2.12.

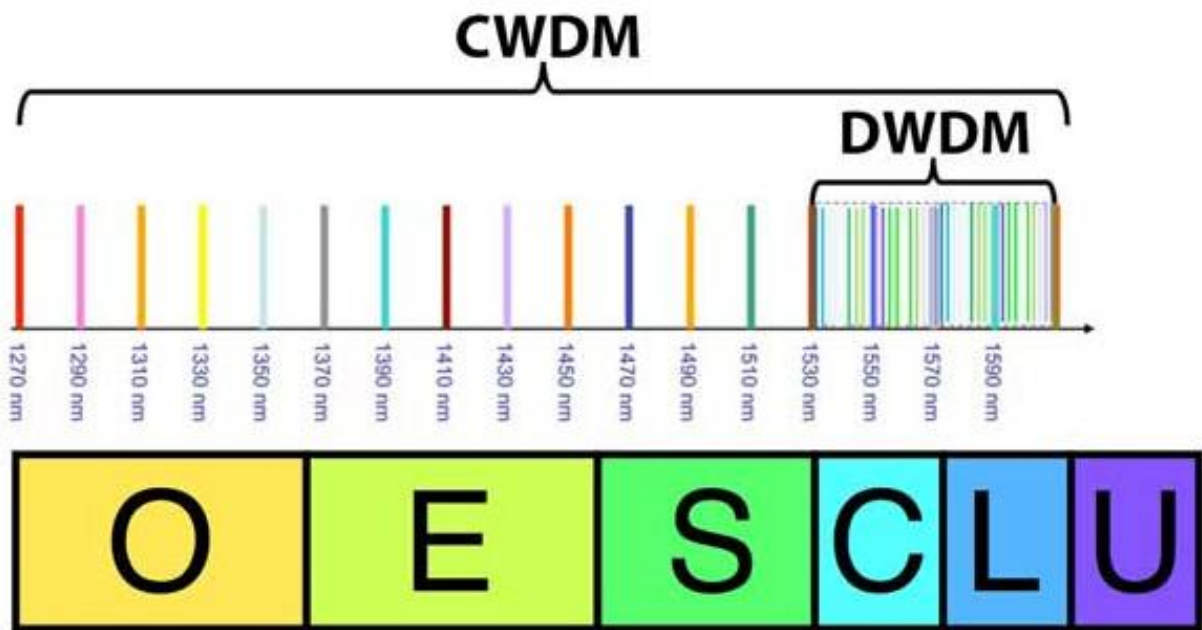


Рис. 2.12. Спектральні діапазони в інтервалі 1260 - 1675 нм.

Стандарт G.652

«Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю» - стандартне одномодове волокно з незміщеною дисперсією (набуло широкого поширення з 1983 року). Його параметри оптимізовані для діапазону довжин хвиль 1310 нм, в якому волокно має нульову хроматичну дисперсію і мінімальне згасання. Діаметр хвилеведучої жили волокна – дорівнює 9 мкм, а оболонки – 125 ± 2 мкм.

Це волокно використовується для однохвильової і багатохвильової передачі (спектральне ущільнення), в тому числі в діапазоні довжин хвиль 1,55 мкм (1550 нм) і забезпечує передачу інформації зі швидкостями до 10 Гбіт/с на середні відстані (до 50 км).

Використання волокна – G.652 при більш високих швидкостях передачі вимагає ускладнення кінцевої апаратури, що, в свою чергу, призводить до значних фінансових витрат.

Стандарт G.653

«Одномодовое оптичного волокно зі зсувом дисперсії» – стандарт G.653 виданий в 1988 році і поширюється на одномодове волокно зі зміщеною нульовою дисперсією на 1,55 мкм (1550 нм). Це волокно має нульову дисперсію в області мінімальних втрат волокна, що досягається за рахунок більш складної структури хвилеведучої жили, а саме спеціально заданому розподілу коефіцієнта заломлення по діаметру жили.

Волокно типу G.653 використовується в протяжних магістральних ширококутових лініях і мережах зв'язку, воно забезпечує передачу інформації на кілька сотень кілометрів зі швидкостями до 40 Гбіт/с. Однак по ньому можна передавати тільки один спектральний канал інформації, тобто воно не може

бути використано в волоконно-оптичних системах і мережах, в яких застосовуються волоконно-оптичні підсилювачі і щільне оптичне спектральне мультиплексування (DWDM-технології). Причина цього полягає в високих рівнях світлової потужності в волокні після посилення і високої щільності спектрального ущільнення, необхідності одночасної передачі великого числа незалежних спектральних каналів по одному волокну.

Висока концентрація світлової потужності в волокні – G.653 через особливості структури жили призводить до появи нелінійних ефектів і, зокрема, чотирьох-хвильового зміщення, яке проявляється при нульовій хроматичній дисперсії і призводить в свою чергу до перехресних перешкод в лінії.

Оптичне волокно даного типу має нульову дисперсію на довжині хвилі 1550 нм. Діаметр модової плями на довжині хвилі 1550 нм – 7,8-8,5 мкм.

Стандарт G.654

«Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю зі зміщеною дисперсією та відсічкою» – стандарт містить опис характеристик одномодового волокна і кабелю, що мають мінімальні втрати на 1,55 мкм (1550 нм). Це волокно було розроблено для застосування в підводних ВОЛЗ. За рахунок великих, ніж у волокна стандарту G.653 розмірів хвилеведучої жили, воно дозволяє передавати більш високі рівні оптичної потужності, але в той же час має більш високу хроматичну дисперсію в діапазоні на 1,55 мкм (1550 нм). Волокно типу G.654 не призначене для роботи на будь-якій іншій хвилі випромінювання окрім 1,55 мкм (1550 нм).

Діаметр модового поля на довжині хвилі 1550 нм: 9,5-10,5 мкм.

Стандарт G.655

«Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю з ненульовим дисперсійним зміщенням» – стандарт G.655 відноситься до волокна зі зміщеною ненульовою дисперсією – NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber). Це волокно призначене для застосування в магістральних волоконно-оптичних лініях і глобальних мережах зв'язку, що використовують DWDM-технології в діапазоні довжин хвиль 1,55 мкм (1550 нм).

Волокно – G.655 має слабку, контрольовану дисперсію в C-діапазоні (1530 – 1565 мкм) і великий діаметр хвилеведучої жили в порівнянні з волокном типу G.653. Це знижує проблему чотирьох хвильового зміщення і нелінійних ефектів і відкриває можливості застосування ефективних волоконно-оптичних підсилювачів.

Оптимізовано для використання в запропонованому діапазоні довжин хвиль від 1530 нм до 1565 нм. Також стандартом передбачена підтримка переходу на більш високі довжини хвиль аж до 1652 нм і на більш низькі - до 1460 нм.

Стандарт G.656

«Характеристики волокна і кабелю з ненульовою дисперсією для широкопугової оптичної передачі» – описує геометричні та механічні характеристики, а також характеристики передачі одномодового оптоволокна,

має позитивне значення коефіцієнта хроматичної дисперсії, що перевищує нульове значення в діапазоні 1460-1625 нм.

Діаметр модового поля на довжині хвилі 1550 нм: 7,0-11,0 мкм.

Стандарт G.657

«Характеристики одномодового оптичного волокна і кабелю, що не чутливий до втрат на макрозгині, для використання в мережах доступу» – волокна мають підвищену стійкість до втрат на макрозгинах. Основне призначення це прокладка всередині приміщень.

Діаметр модового поля на довжині хвилі 1310 нм: 6,3-9,5 мкм.

У ступінчастому одномодовому волокні (SM) діаметр світлонесучої жили становить 8-10 мкм і можна порівняти з довжиною світлової хвилі. У такому волокні за досить великої довжини хвилі світла поширюється лише один промінь (одна мода). Одномодовий режим в одномодовому волокні реалізується у вікнах прозорості 1310 та 1550 нм. Поширення лише однієї моди усуває міжмодову дисперсію та забезпечує дуже високу пропускну здатність одномодового волокна у цих вікнах прозорості.

В одномодовому волокні зі зміщеною дисперсією (DSF) довжина хвилі, на якій результуюча дисперсія перетворюється на нуль – довжина хвилі нульової дисперсії – зміщена у вікно 1550 нм. Таке усунення досягається завдяки спеціальному профілю показника заломлення волокна, рис. 12. Таким чином, у волокні зі зміщеною дисперсією реалізуються найкращі характеристики як мінімум дисперсії, так і мінімум втрат.

Одномодове волокно з ненульовою зміщеною дисперсією NZDSF, на відміну від DSF, оптимізовано для передачі не однієї довжини хвилі, а відразу кількох довжин хвиль (мультиплексованого сигналу).

Передача мультиплексованого сигналу на великі відстані вимагає використання лінійних широкосмугових оптичних підсилювачів, у тому числі найбільшого поширення отримали так звані ербієві підсилювачі з використанням легованого ербієм волокна (EDFA).

В табл. 2.5. представлена узагальнена інформація по волокнам стандарта G.652.

Табл. 2.5. Характеристики одномодових оптичних волокон типу G.652

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ІТУ-Т			
	G.652A	G.652B	G.652C	G.652D
Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1310 нм)	8,6 ... 9,5 ± 0,6	8,6 ... 9,5 ± 0,6	8,6 ... 9,5 ± 0,6	8,6 ... 9,5 ± 0,6
Діаметр оболонки, мкм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Максимальний ексцентриситет серцевини/оболонки, мкм	0,6	0,6	0,6	0,6

Максимальна некруглість оболонки, %	1	1	1	1
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1260	1260	1260	1260
Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі:				
1550 нм	0,1	-	-	-
1625 нм	-	0,1	0,1	0,1
Мінімальне перевірочне навантаження на розрив, ГПа	0,69	0,69	0,7	0,69
Довжина хвилі нульової дисперсії, мкм	1300-1324	1300-1324	1300-1324	1300-1324
Нахил хроматичної дисперсії поблизу нульового значення, пс/(нм ² × км)	0,092	0,092	0,1	0,092
Максимальний коефіцієнт згасання, дБ/км, в діапазоні довжин хвиль:				
1310 нм;	0,35-0,4	0,4	-	-
1310 ... 1625 нм;	-	-	0,4	0,4
1383 нм;	-	-	0,4	0,4
1550 нм;	0,4	0,35	0,3	0,3
1625 нм	-	0,4	0,4	0,4
Максимальний коефіцієнт PMD, пс/км ^{1/2}	0,5	0,2	0,5	0,2

В табл. 2.6. представлена узагальнена інформація по волокнам стандарта G.653.

Табл. 2.6. Характеристики одномодових оптичних волокон типу G.653

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ІТУ-Т	
	G.653A	G.653B

Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1550 нм)	7,8 ... 8,5 ± 0,8	7,8 ... 8,5 ± 0,6
Діаметр оболонки, мкм	125 ± 1	125 ± 1
Максимальний ексцентриситет серцевини/оболонки, мкм	0,8	0,6
Максимальна некруглість оболонки, %	2	1
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1270	1270
Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі 1550 нм	0,5	0,1
Мінімальне перевірочне навантаження на розрив, ГПа	0,69	0,69
Довжина хвилі нульової дисперсії, мкм	1550 нм ± 10 нм	-
Максимальний коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм × км) в діапазоні довжин хвиль		
1525-1575 нм	3,5	
1460-1525 нм		- 9 ... - 3,5
1525-1625 нм		-3,5 ... + 1,7
1460-1575 нм		-1,9 ... + 3,5
1575-1625 нм		+3,5 ... + 7,8

Нахил хроматичної дисперсії поблизу нульового значення, пс/(нм × км)	0,085	-
Максимальний коефіцієнт згасання, дБ/км, в діапазоні довжин хвиль 1550 нм	0,35	0,35
Максимальний коефіцієнт PMD, пс/Окм	0,5	0,2

В табл. 2.78. представлена узагальнена інформація по волокнам стандарта G.654.

Табл. 2.7. Характеристики одномодових оптичних волокон типу G.654

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ІТУ-Т		
	G.654A	G.654B	G.654C
Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1310 нм)	9,5 ... 10,5 ± 0,7	9,5 ... 13,0 ± 0,7	9,5 ... 10,5 ± 0,7
Діаметр оболонки, мкм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Максимальний ексцентриситет серцевини/оболонки, мкм	0,8	0,8	0,6

Максимальна некруглість оболонки, %	2	2	2
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1530	1530	1530
Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі 1625 нм	0,5	0,5	0,5
Мінімальне перевірочне навантаження на розрив, ГПа	0,69	0,69	0,69
Максимальний коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм × км), в діапазоні довжин хвиль 1550 нм	20	22	20
Нахил хроматичної дисперсії поблизу нульового значення, пс/(нм ² × км)	0,07	0,07	0,07
Максимальний коефіцієнт згасання, дБ/км, в діапазоні довжин хвиль 1550 нм	0,22	0,22	0,22
Максимальний коефіцієнт PMD, пс/Öкм	0,5	0,2	0,2

В табл. 2.8. представлена узагальнена інформація по волокнам стандарта G.655.

Табл. 2.8. Характеристики одномодових оптичних волокон типу G.655

Параметр (характеристика)	Тип волокна, відповідно до Рекомендацій ІТУ-Т				
	G.655A	G.655B	G.655C	G.655D	G.655E
Діаметр модової плями, нм (на довжині хвилі 1310 нм)	8,0 ... 11,0 ± 0,7	8,0 ... 11,0 ± 0,7	8,0 ... 11,0 ± 0,7	8,0 ... 11,0 ± 0,6	8,0 ... 11,0 ± 0,6
Діаметр оболонки, мкм	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
Максимальний ексцентриситет серцевини/оболонки, мкм	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
Максимальна некруглість оболонки, %	2	2	2	1	1
Максимальна довжина хвилі зрізу ОВ в кабелі, мкм	1450	1450	1450	1450	1450
Максимальні втрати на макрозгині (100 витків радіусом 30 мм), дБ, на довжині хвилі 1625 нм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Мінімальне перевірочне навантаження на розрив, ГПа	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
Максимальний коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм × км), в діапазоні довжин хвиль					
- 1530-1565 нм;	+/- (0,1 ... 6)	+/- (1 ... 10) $D_{max} - D_{min} \leq 5$	+/- (1 ... 10) $D_{max} - D_{min} \leq 5$	-4,2...+6,2 +2,8...+11,3	+0,2...+ 5,8 +4,7...+13,4
- 1460-1550 нм;					
- 1550-1625 нм					
Максимальний коефіцієнт згасання, дБ/км, в діапазоні довжин хвиль:					
1550 нм;	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
1625 нм	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Максимальний коефіцієнт PMD, пс/км ^{1/2}	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2

На рис. 2.13. показано застосування деяких типів одномодових волокон на мережах.

	≥160	CWDM G.652.C G.655		3 WDM G.655, G.656				
≤40	≤160	G.652		WDM G.652.B,D G.655 G.656		Без WDM G.653 3 WDM G.652.D, G.655, G.656		
≤10	≤40							
≤10	≤10							
≤2,5	≤10							
≤2,5	≤2,5							
	≤1	G.657						
Поточна	Майбутня	0-500 м	0-20 км	0-70 км	70-200 км	200-500 км	500-1200 км	>1200 км
Швидкість передачі, Гбіт/с		Домові мережі	Мережі доступу	Міські мережі		Довгі мережі		Наддовгі мережі

Рис. 2.13. Варіанти застосування одномодових оптичних воокон на мережах.

Зазвичай патчкордова оболонка на одмодових кабелях жовтого кольору з маркуванням E9, 9/125 та SMF або з вказанням конкретного типу стандарту, якому відповідає волокно.

Полімерне оптичне волокно (POF)

Полімерне оптичне волокно (POF) має серцевину з поліметилметакрилату (PMMA) і оболонку з фторполімерів (рис. 2.4.5.). Показник заломлення серцевини – 1,49, оболонки – 1,41, числова апертура – $0,5 \pm 0,05$. Згасання в POF становить 50-150 дБ/км на 650 нм, що значно вище, ніж у кварцових волокон (0,35 дБ/км). POF застосовується в мережах типу «волокно до будинку» та промислових системах завдяки простоті монтажу й низькій вартості. Полімерне (пластикове) оптичне волокно POF, яке використовується сьогодні, може витримувати значні температури від -40°C до +85°C (+105°C зі спеціальним покриттям).

В даний час виробляються POF волокна діаметром 50, 62,5, 120 і 980 мкм і оболонкою діаметром 490 і 1000 мкм. За допомогою полімерного (пластикового) оптичного волокна можна передати Ethernet 10/100 Мбіт на відстані близько 100 м, на довжинах хвиль 850 та 1310 нм. Однак основне застосування POF знаходить на довжинах хвиль в 650 нм.



Рис. 2.14. Полімерне оптичне волокно (POF)

В таблиці 2.9. представлені характеристики полімерного кабелю виробництва чеської компанії Optokon.

Табл. 2.9. Характеристики полімерного оптичного волокна

Серцевина	Матеріал серцевини	PMMA (поліметилметакрилатт)
	Матеріал оболонки	Фторований полімер
	Діаметр серцевини (мкм)	980 ± 60
	Діаметр оболонки (мкм)	1000 ± 60
	Некруглість оболонки (%)	≤ 6
	Показник заломлення серцевини	1,49
	Показник заломлення оболонки	1,41
	Числова апертура	0,5 ± 0,05
Оболонка зовнішня	Матеріал	PE (поліетилен)
	Діаметр	4,4 ± 0.2
	Колір патчкордової оболонки	Чорный
Орієнтовна вага (г/м)	10,5	

2.5. Оптичний бюджет у волоконно-оптичних лініях

Оптичний бюджет є ключовим параметром у проектуванні та експлуатації волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Він визначає, наскільки ефективно система може передавати сигнал без втрати якості та є основою для забезпечення надійності зв'язку.

Що ж таке оптичний бюджет?

Оптичний бюджет – це різниця між максимальною потужністю оптичного передавача та мінімальною чутливістю оптичного приймача. Ця різниця визначає, скільки енергії можна втратити під час передачі оптичного сигналу, перш ніж система перестане працювати належним чином (приймач не зможе отримати оптичний сигнал належної якості).

Формула оптичного бюджету:

$$P = P(Tx) - P(Rx) \quad (2.11)$$

Де:

$P(Tx)$ - потужність передавача

$P(Rx)$ - чутливість приймача

Типовими значеннями вважаються такі:

- потужність лазерного передавача: від -5 до +5 дБм;
- чутливість приймача: від -18 до -30 дБм.

Оптимальна робоча зона сигналу: від -10 до -25 дБм (залежно типу обладнання).

Але під час передачі сигналу через волоконно-оптичний кабель виникають такі основні джерела втрат:

Втрати в волокні. Залежно від довжини та якості кабелю, типові втрати становлять приблизно 0,2-0,5 дБ на кілометр для сучасних волокон (на довжині хвилі 1310 нм - 0,38 дБ/км, на довжині хвилі 1550 - 0,25 дБ/км).

Стикові втрати. Виникають на з'єднаннях між кабелями (місця зварки – зварні з'єднання) або оптичними компонентами, наприклад, конекторах (роз'ємні з'єднання). Вони зазвичай складають 0,1-0,5 дБ - на місцях роз'ємних з'єднань (конектори) та 0,01 дБ на місцях зварки волокон.

Втрати на розгалуженнях. Зокрема в пасивних оптичних мережах (PON, Passive Optical Network), втрати можуть досягати 3-5 дБ на один розгалужувач.

Втрати через згини. Неправильне згинання кабелю може призвести до суттєвих втрат потужності.

Відповідно, для прорахування всіх втрат ми повинні скласти всі втрати у волоконно-оптичній лінії:

$$A_{\text{сум}} = A_{\text{волокно}} + A_{\text{зварні}} + A_{\text{конектори}} + A_{\text{пасивне обладнання}} \quad (2.12)$$

Де:

$A_{\text{сум}}$ – загальні втрати в лінії;

$A_{\text{волокно}}$ – згасання волоконно-оптичного кабелю;

$A_{\text{зварні}}$ – згасання в місцях зварки;

$A_{\text{конектори}}$ – згасання на конекторах, або інших роз'ємних з'єднаннях;

$A_{\text{пасивне обладнання}}$ – згасання в пасивних компонентах мережі (сплітери, мультиплексори/демультиплексори тощо).

Балансування оптичного бюджету.

Для забезпечення стабільної роботи ВОЛЗ важливо дотримуватися балансу між бюджетом і фактичними втратами. Волоконно-оптичні системи зазвичай проектуються з урахуванням певного резерву (запасу) для компенсації додаткових втрат через старіння компонентів, зміни середовища або обслуговування. Цей резерв, як правило, становить 3-6 дБ.

Приклад розрахунку:

Припустимо, потужність передавача становить (Tx): $\sim +2$ dBm, а чутливість приймача (Rx): ~ -20 dBm.

Згідно наведеної вище формули розраховуємо оптичний бюджет:

$$+2 \text{ dBm} - (-20 \text{ dBm}) = 22 \text{ dBm} \quad (2.13)$$

Таким чином, оптичний бюджет (P) оптичної лінії становить приблизно 22 дБ.

Якщо сумарні втрати в лінії, включно з волокном та розгалуженнями, складають до 22 дБ, то система працюватиме надійно. Однак при втраті понад 22 дБ сигнал буде недостатнім для прийому.

Яле знаючи оптичний бюджет та характеристики траси ми можемо розрахувати відстань, на яку у нас буде працювати обладнання. Нижче наведено кілька прикладів для оптичного модуля QDD-400G-ZR/JCO400-QDD-ZR виробництва компанії Juniper Networks.

Приклад 1 (рис. 2.15.). Бюджет лінії 10 дБ (P) для модуля QDD-400G-ZR / JCO400-QDD-ZR. Одноканальний нелінійний (без підсилювачів) лінк з використанням модулів QDD-400G-ZR / JCO400-QDD-ZR. Треба розрахувати максимальну відстань.



Рис. 2.15. Одноканальний нелінійний (без підсилювачів) оптичний лінк (лінія зв'язку) з використанням модулів QDD-400G-ZR / JCO400-QDD-ZR.

Умови:

- Згасання волокна ($A_{\text{вол}}$) = 0,23 дБ/км;
- Кількість роз'ємів (N) = 2;
- Втрати на кожен роз'єм ($A_{\text{кон}}$) $\approx 0,3$ дБ (типове значення);

- Втрати на пасивном обладнанні ($A_{\text{пас.обл}} = 0$ (немає пас. обладнання));
- Втрати на зварки ($A_{\text{зварн}} = 0$ (немає зварок));
- Маржа резерву ($M)^* = 0,05$ дБ.

* Маржа резерву - це запас потужності, який залишають у бюджеті зв'язку для компенсації непередбачених втрат або змін у майбутньому.

Розрахунок:

$$d = \frac{P - A_{\text{кон}} * 2 - A_{\text{пас.обл}} * 0 - A_{\text{зварн}} * 0 - M}{A_{\text{вол}}} = \frac{10\text{дБ} - 2 * 0,3\text{дБ} - 0 - 0 - 0,05\text{дБ}}{0,23\text{дБ} / \text{км}} =$$

$$(2.14)$$

$$= \frac{10\text{дБ} - 0,6\text{дБ} - 0,05\text{дБ}}{0,23\text{дБ} / \text{км}} = \frac{9,35\text{дБ}}{0,23\text{дБ} / \text{км}} = 40,65\text{км}$$

Як видно з наведеного розрахунку максимальна відстань роботи модуля QDD-400G-ZR / JCO400-QDD-ZR при таких параметрах лінії буде складати 40,65 км.

Приклад 2 (2.16.). Бюджет лінії 10 дБ (P) для модуля QDD-400G-ZR / JCO400-QDD-ZR з 8-канальним мультиплексором виробництва компанії Adtran (колишня Adva). Треба розрахувати максимальну відстань.

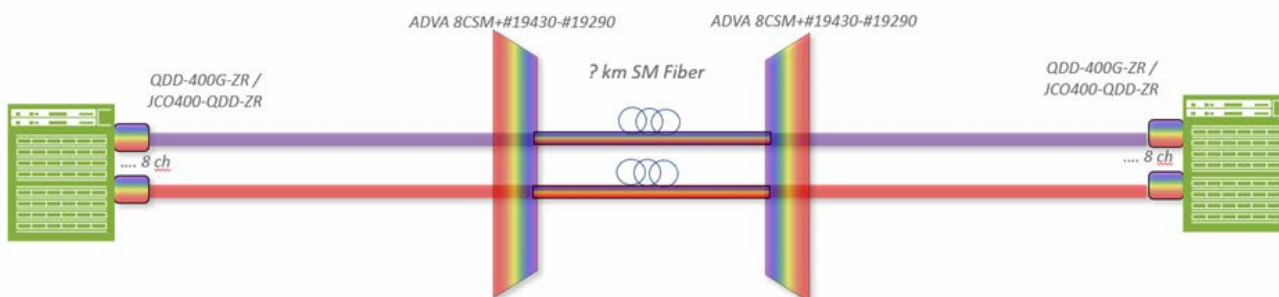


Рис. 2.16. 8-канальний нелінійний (без підсилювачів) оптичний лінк (лінія зв'язку) з використанням модулів QDD-400G-ZR / JCO400-QDD-ZR

Умови:

- Згасання волокна ($A_{\text{вол}} = 0,23$ дБ/км);
- Кількість роз'ємів = 2;
- Втрати на кожен роз'єм ($A_{\text{кон}} \approx 0,3$ дБ (типове значення));
- Кількість мультиплексорів = 2;
- Втрати на мультиплексорах ($A_{\text{пас.обл}} = 1,8$ дБ (згідно специфікації Adtran));
- Втрати на зварки ($A_{\text{зварн}} = 0$ (немає зварок));
- Маржа резерву ($M)^* = 0,05$ дБ.

Розрахунок:

$$d = \frac{P - A_{\text{кон}} * 2 - A_{\text{пас.обл}} * 2 - A_{\text{зварн}} * 2 - M}{A_{\text{вол}}} = \frac{10\text{дБ} - 2 * 0,3\text{дБ} - 2 * 1,8 - 0 - 0,05\text{дБ}}{0,23\text{дБ/км}} = \quad (2.15)$$

$$= \frac{10\text{дБ} - 0,6\text{дБ} - 3,6\text{дБ} - 0,05\text{дБ}}{0,23\text{дБ/км}} = \frac{5,75\text{дБ}}{0,23\text{дБ/км}} = 25\text{км}$$

Як видно з наведеного розрахунку максимальна відстань роботи модуля QDD-400G-ZR / JCO400-QDD-ZR при таких параметрах лінії буде складати 25 км.

Як висновок, оптичний бюджет – це основний параметр, що визначає проектування ВОЛЗ. Його правильний розрахунок дозволяє забезпечити стабільну та ефективну роботу системи, попереджаючи ризики втрати сигналу. Баланс між потужністю передавача, чутливістю приймача та фактичними втратами є критичним для досягнення високоякісного зв'язку.

Використана література для написання розділу [1, 4, 5, 7, 10, 11, 20, 28, 30, 34, 73, 77, 78, 79, 80, 81, 82].

Загальні питання для самоконтролю до розділу

- Які основні переваги ВОЛЗ?
- Які недоліки волоконно-оптичних технологій?
- Що таке згасання світла у волоконно-оптичному кабелі?
- Які фактори впливають на згасання сигналу у волокні?
- Які типи оптичних волокон існують?
- Що таке нормована частота оптичного волокна?
- Як оптичний бюджет впливає на розрахунок ВОЛЗ?
- Що таке вікна прозорості у волоконно-оптичних системах?
- Які основні чинники впливають на поширення світла в оптичному волокні, і чому вони важливі?
- Як відносна різниця показників заломлення серцевини та оболонки впливає на розповсюдження світла у волокні?
- Що таке довжина хвилі відсічення і чому вона важлива для одномодових волокон?
- Як дисперсія впливає на якість переданої інформації, і які її основні види?
- Яким чином смуга пропускання пов'язана з дисперсією, і як вона визначає максимальну частоту сигналу?
- Які фізичні та експлуатаційні переваги оптичного волокна як діелектричного матеріалу роблять його незамінним для ліній зв'язку в умовах високого ризику (наприклад, на хімічних чи нафтопереробних підприємствах) та в середовищах із сильними електромагнітними перешкодами?
- Порівняйте багатомодові волокна стандартів OM3 та OM4 за такими параметрами: діаметр серцевини, максимальна відстань передачі для 10 Гбіт/с,

підтримка 40/100 Гбіт/с, тип джерела сигналу та колір оболонки патчкорду. У яких сценаріях застосування OM4 має перевагу над OM3?

- Поясніть відмінності між волокнами стандартів ITU-T G.652, G.653 та G.655 за такими характеристиками: довжина хвилі нульової дисперсії, область застосування (одноканальна чи DWDM), рівень нелінійних ефектів (наприклад, чотирьоххвильове змішування) та типові значення згасання на 1550 нм.

- Як розраховується сумарне згасання у волоконно-оптичній лінії, і які типові значення втрат (у дБ) для кожного компонента (волокно, зварка, конектор, пасивне обладнання) необхідно враховувати при проектуванні лінії?

- Що таке числова апертура оптичного волокна і як її велике значення впливає на прийом світла та дальність передачі порівняно з кварцовими волокнами?

3. Пасивне обладнання оптичне обладнання

До пасивного оптичного обладнання можна віднести:

- Оптичний кабель
- Оптичні роз'єми
- Оптичні кроси (ODF)
- Оптичні муфти
- Патчкорди та пігтейли
- Оптичні атенюатори
- Спліттери
- Мультиплексори
- Циркулятори

3.1. Оптичний кабель

Волоконно-оптичний кабель – це середа передачі даних, яка використовує світлові сигнали замість електричних імпульсів. Його основна перевага полягає у високій швидкості передачі інформації та здатності долати великі відстані без значних втрат сигналу. Завдяки цьому волоконно-оптичні технології стали незамінними у сфері телекомунікацій, інтернет-зв'язку, а також у різних галузях науки та промисловості.

Конструкція волоконно-оптичного кабелю складається з тонких оптичних волокон, виготовлених із скла або пластику, які покриті декількома шарами захисту для забезпечення міцності та довговічності. Світлові імпульси, що проходять через ці волокна, відбиваються всередині завдяки явищу повного внутрішнього відбиття, що мінімізує втрати сигналу і забезпечує стабільність передачі даних. Завдяки цій особливості волоконно-оптичні кабелі мають значні переваги над традиційними мідними проводами, які схильні до електромагнітних завад і обмежені у швидкості передачі.

Застосування волоконно-оптичних кабелів охоплює широкий спектр сфер – від глобальних магістральних до локальних мереж, таких як домашній інтернет або корпоративні інформаційні системи. Їх популярність зростає через підвищений попит на швидкісні технології та необхідність обміну великими обсягами даних/інформації. Завдяки цьому волоконно-оптичні кабелі є основою сучасної цифрової інфраструктури. Вони забезпечують ефективний, стабільний та безпечний зв'язок для користувачів по всьому світу. Але волоконно-оптичні кабелі знаходять застосування не лише в телекомунікаціях, але і в енергетиці, медицині, важкій промисловості та інших галузях.

Про типи оптичних волокон – одномодові (SM, Singlemode) та багатомодові (MM, Multimode) та відповідність їх сучасним стандартам було розказано у розділі 2.4. Зараз приділимо більше уваги саме волоконно-оптичним кабелям, їх структурі та призначенню.

Виробництво волоконно-оптичного кабелю починається з виготовлення оптичного волокна, яке є його основним елементом. Спочатку сировина, зазвичай кварцовий пісок, проходить процес очищення та переплавлення у

високотемпературних умовах, щоб утворити чисте скло. Потім скляний пруток (преформа) витягують у тонке волокно, нагріваючи його до високих температур і контролюючи діаметр волокна за допомогою лазерних датчиків. Важливим етапом є нанесення спеціального захисного покриття, що запобігає механічним пошкодженням і впливу навколишнього середовища.

Як приклад можна привести метод модифікованого хімічного осадження шляхом випаровування (MCVD-процес) – ця технологія використовується для виготовлення високоякісних оптичних волокон шляхом контрольованого осадження матеріалу всередині кварцової трубки, яка потім витягується у тонке волокно. В цьому методі використовується установка для витягування волокна – це спеціалізоване обладнання, яке використовується у виробництві оптичних волокон. Вона складається з високотемпературної печі, яка нагріває преформу (скляний циліндр) до температури понад 2000°C, дозволяючи витягувати з неї тонке волокно. Процес виготовлення оптичних волокон показаний на рис. 3.1. – 3.4.

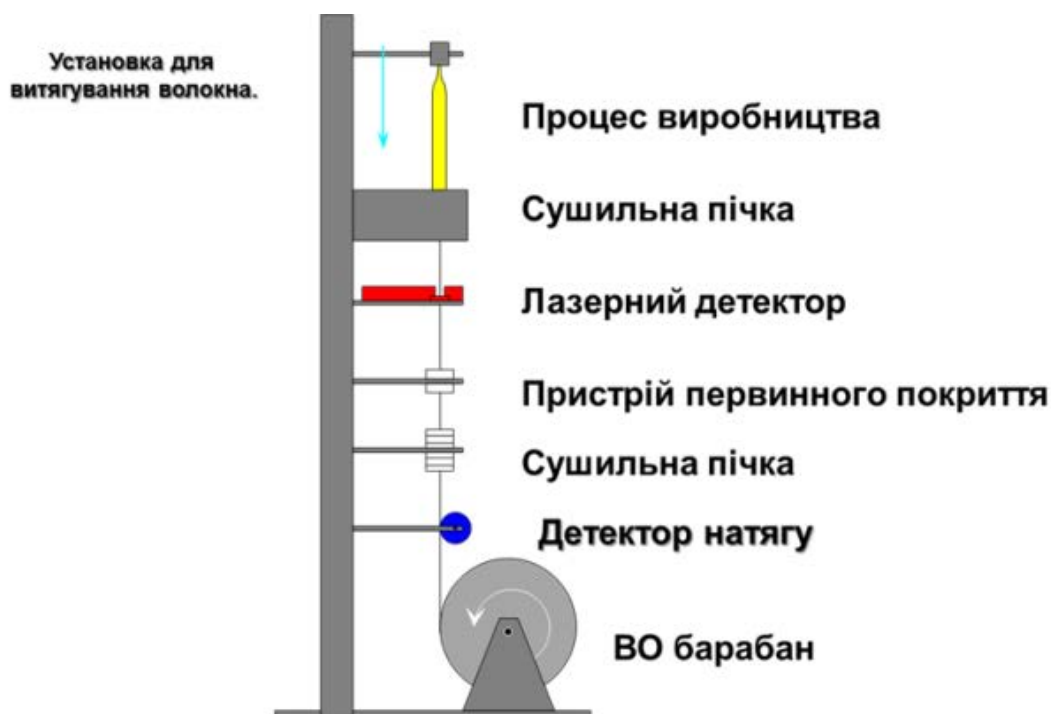


Рис. 3.1. Установка для витягування волокна.

Процес витягування контролюється лазерними датчиками, які стежать за діаметром волокна, забезпечуючи точність і стабільність виробництва. Після витягування волокно проходить етап нанесення захисного покриття для підвищення механічної міцності та стійкості до зовнішніх факторів. Детектор натягу – це пристрій, який використовується для вимірювання сили натягу волокна. Він допомагає контролювати рівень натягу під час виробництва, запобігаючи пошкодженням та забезпечуючи стабільність конструкцій.

Метод модифікованого хімічного осадження шляхом випаровування (MCVD-процес).

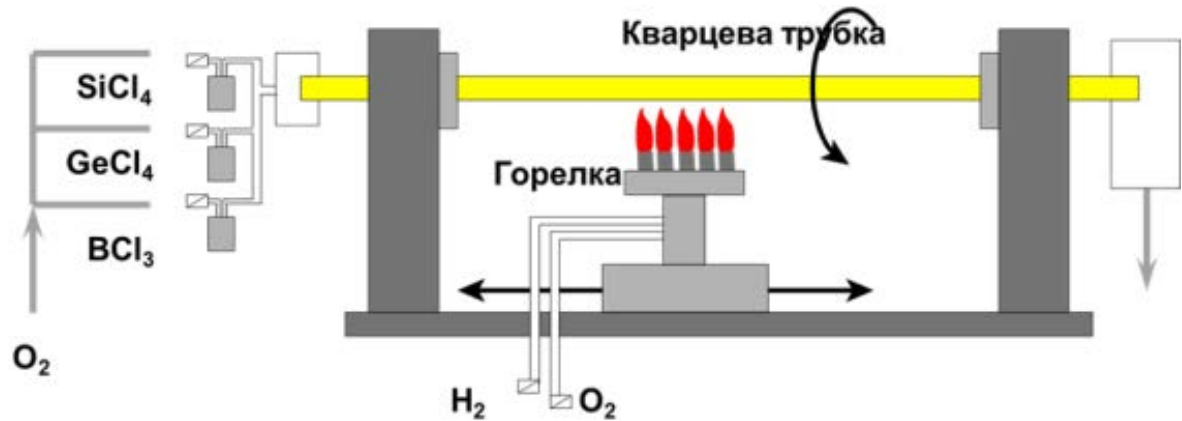


Рис. 3.2. Процес виробництва оптичного волокна.

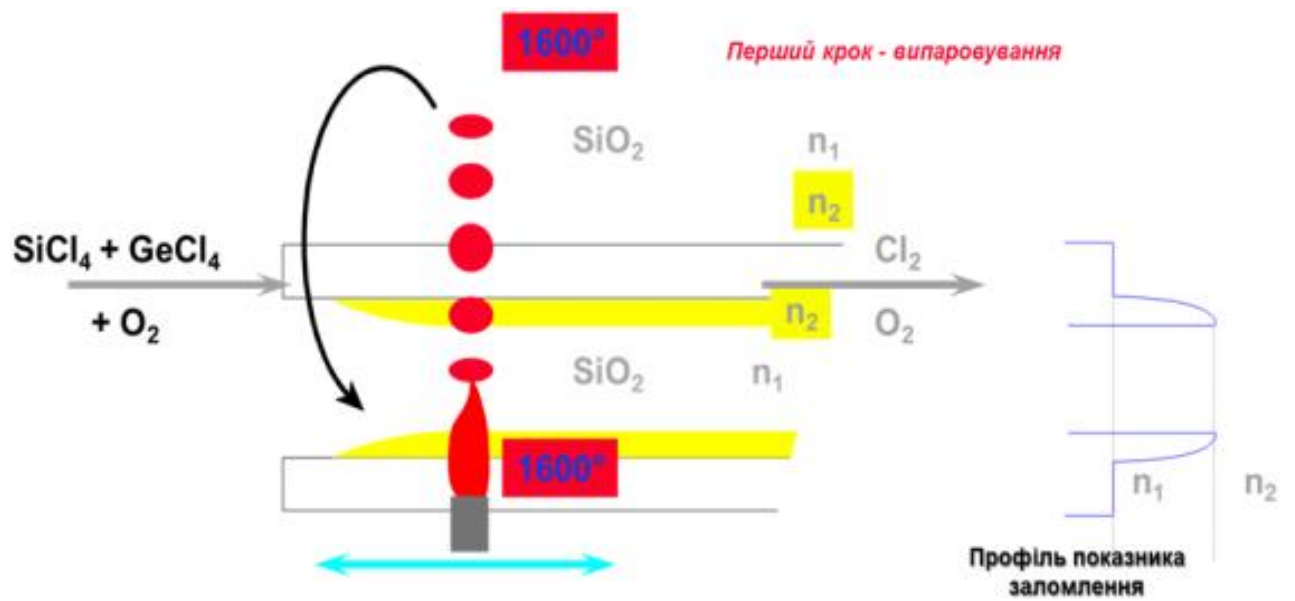


Рис. 3.3. Перший крок – випаровування.

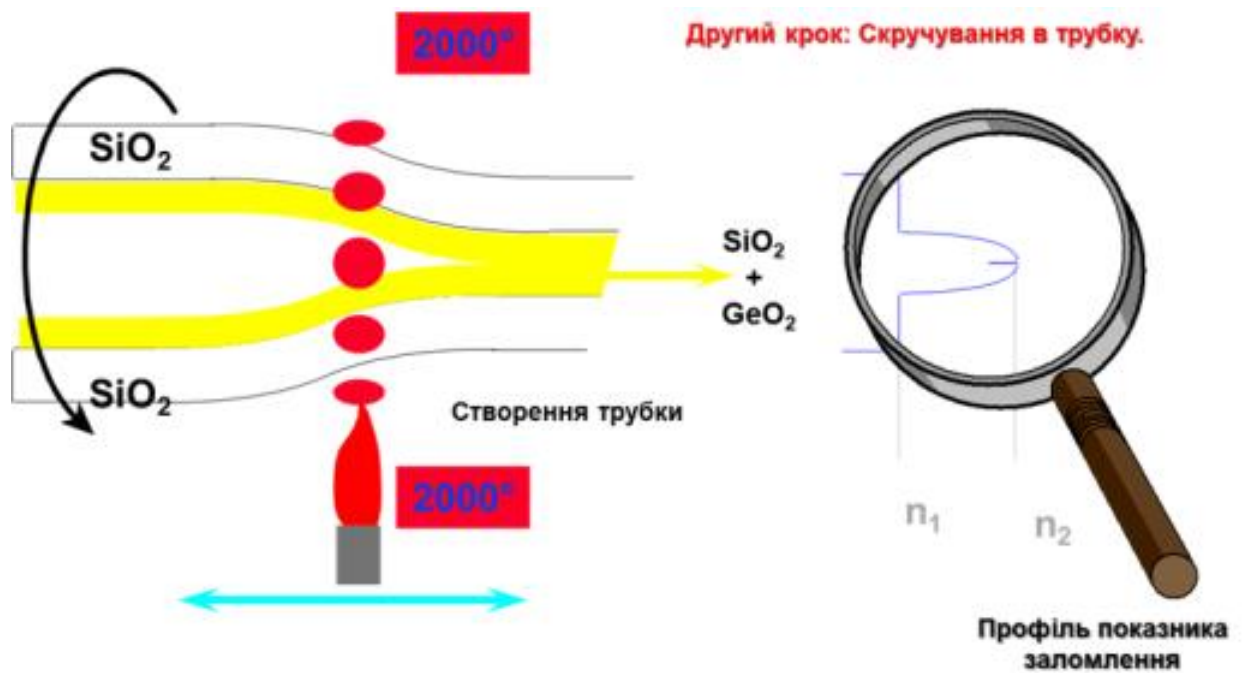


Рис. 3.4. Другий крок – скручування в трубку.

Після створення оптичного волокна воно інтегрується в кабельну конструкцію. Волокна групуються, обгортаються амортизаційними матеріалами та розміщуються у захисній оболонці, яка може бути виготовлена з пластику або металу, залежно від умов експлуатації. Останнім кроком є тестування готового кабелю на міцність, гнучкість та якість передачі сигналу.

За призначенням волоконно-оптичні кабелі краще всього розділити на такі групи:

- кабелі зовнішнього прокладання;
- кабелі внутрішнього прокладання;
- універсальні кабелі.

Види кабелів для зовнішнього та внутрішнього прокладання показані на рис. 3.5.

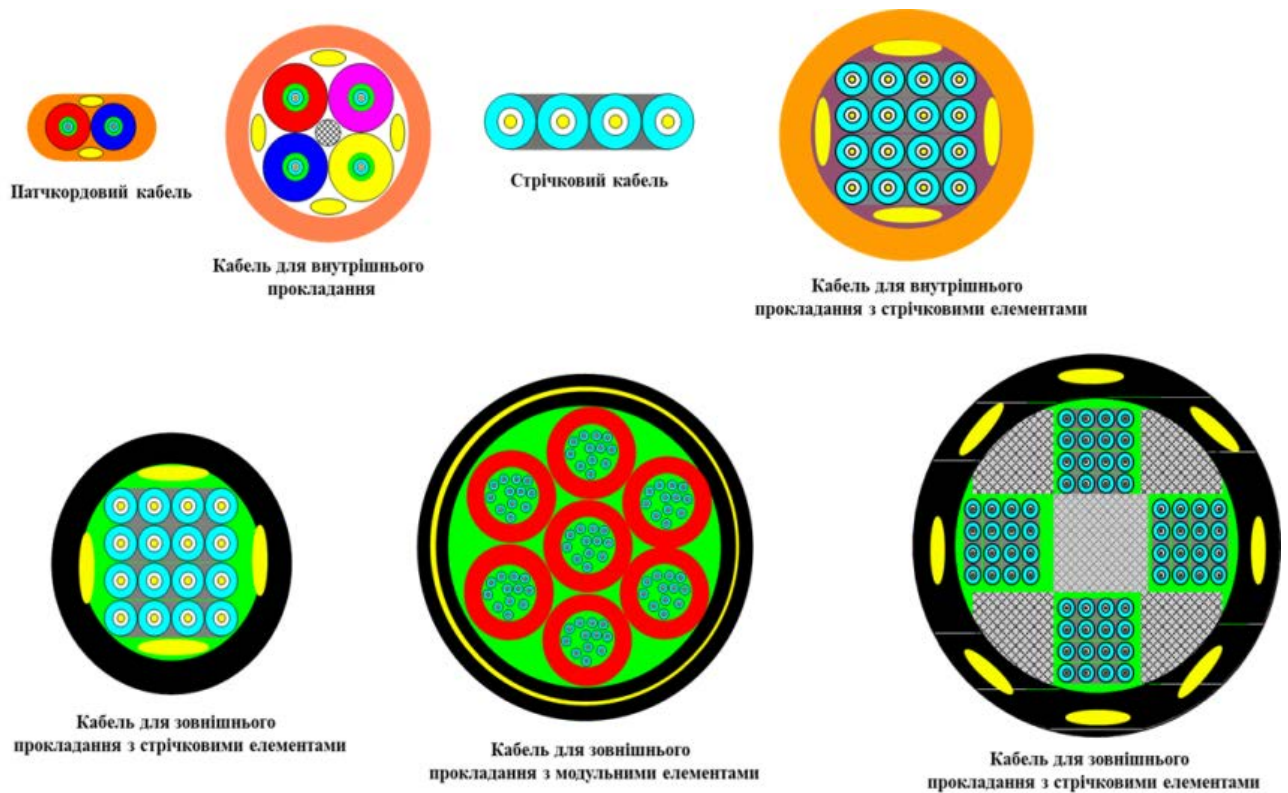


Рис. 3.5. Кабелі (деякі види конструкції) для внутрішнього (верхній ряд) та зовнішнього прокладання (нижній ряд).

Кабелі зовнішнього прокладання – це кабелі, які призначені виключно для прокладання поза приміщеннями. Вони мають підвищену стійкість до впливу зовнішніх факторів, таких як волога, перепади температур, ультрафіолетове випромінювання та механічні навантаження. Конструкція таких кабелів часто включає додаткову герметизацію, міцну зовнішню оболонку та, у деяких випадках, броньований шар для захисту від фізичних пошкоджень. Їх застосовують для прокладання між будівлями, у кабельних каналізаціях, під землею, на опорах повітряних ліній зв'язку або електроопорах, під водою.

Кабелі внутрішнього прокладання – це кабелі, які можна використовувати лише в межах приміщень. Вони відрізняються меншою стійкістю до агресивних зовнішніх умов, оскільки не піддаються таким же впливам, як зовнішні кабелі. Основні вимоги до них – гнучкість, компактні розміри та знижена горючість матеріалів, щоб відповідати нормам пожежної безпеки. Такі кабелі зазвичай прокладаються у стінах, підлозі, стелях, серверних шафах чи інших внутрішніх телекомунікаційних мережах. Зазвичай кабелі внутрішнього прокладання мають на своїй оболонці маркування LSZH.

LSZH (Low Smoke Zero Halogen) – це тип кабельної оболонки, яка має низьке димоутворення та не містить галогенів. Вони особливо популярні у житлових і комерційних будівлях, центрах обробки даних, транспортних системах та інших критичних об'єктах, де важлива пожежна безпека та

мінімальний вплив токсичних речовин. На відміну від традиційних ПВХ-кабелів, LSZH-кабелі при горінні не виділяють густого диму та агресивних газів, що робить їх більш безпечними для використання в закритих приміщеннях. Вони також мають високу стійкість до корозії та механічних пошкоджень, що забезпечує їхню довговічність. Також на кабелях для використання в середині приміщень може використовуватись маркування: LSOH (Low Smoke Zero Halogen), LSHF (Low Smoke Halogen Free), FRNC (Flame Retardant Non-Corrosive), що також позначає кабелі з низьким димоутворенням, які не містять галогенів і мають вогнестійкі властивості. На відміну від LSZH, позначення FRNC не завжди означає відсутність галогенів. Кабелі з такою оболонкою можуть мати додаткові маркування, наприклад, FRNC/LSZH, що вказує на поєднання вогнестійкості та низького димоутворення.

Універсальні кабелі – це кабелі, які можуть бути прокладені як всередині приміщень, так і ззовні. Вони мають захисні властивості, достатні для використання в зовнішніх умовах, але при цьому відповідають вимогам внутрішньої прокладки. Їх часто використовують для спрощення монтажу та зменшення потреби у різних типах кабелів на одному об'єкті. Такі кабелі можуть мати міцну оболонку, що захищає їх від зовнішніх факторів, але при цьому вони залишаються достатньо гнучкими для зручного прокладання в приміщеннях.

Основними компонентами оптичного кабелю є серцевина волокна, яка проводить світлові сигнали, зовнішня оболонка, що захищає кабель від фізичних пошкоджень, та захисне покриття, яке допомагає мінімізувати вплив навколишнього середовища. Додаткові елементи, такі як буферні шари, гель або повітряні проміжки, підвищують міцність і стабільність передачі сигналу. Кабелі умовно можна розділити на кабелі з плотним, полуплотним та пустотілим буфером.

Плотний буфер – це тип захисного покриття, яке щільно прилягає до оптичного волокна, забезпечуючи додатковий захист від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища.

Полуплотний буфер – це проміжний тип буферного покриття в оптичних кабелях, який має властивості як плотного, так і пустотілого буфера. Він забезпечує достатній захист волокна від механічних пошкоджень, але водночас зберігає певну гнучкість та легкість монтажу. Такий буфер може містити повітряні або гелеві проміжки, що допомагають зменшити вплив зовнішніх факторів, зокрема вібрацій та температурних змін. Його застосовують у кабелях, які потребують балансу між міцністю та гнучкістю, наприклад, у внутрішніх мережах або спеціалізованих телекомунікаційних системах.

Пустотілий буфер – це покриття, всередині якого є простір (зазвичай заповнений повітрям або гелем), що забезпечує кращу гнучкість кабелю та зменшує вплив зовнішніх механічних факторів.

Різниця між буферами показана на рис. 3.6.

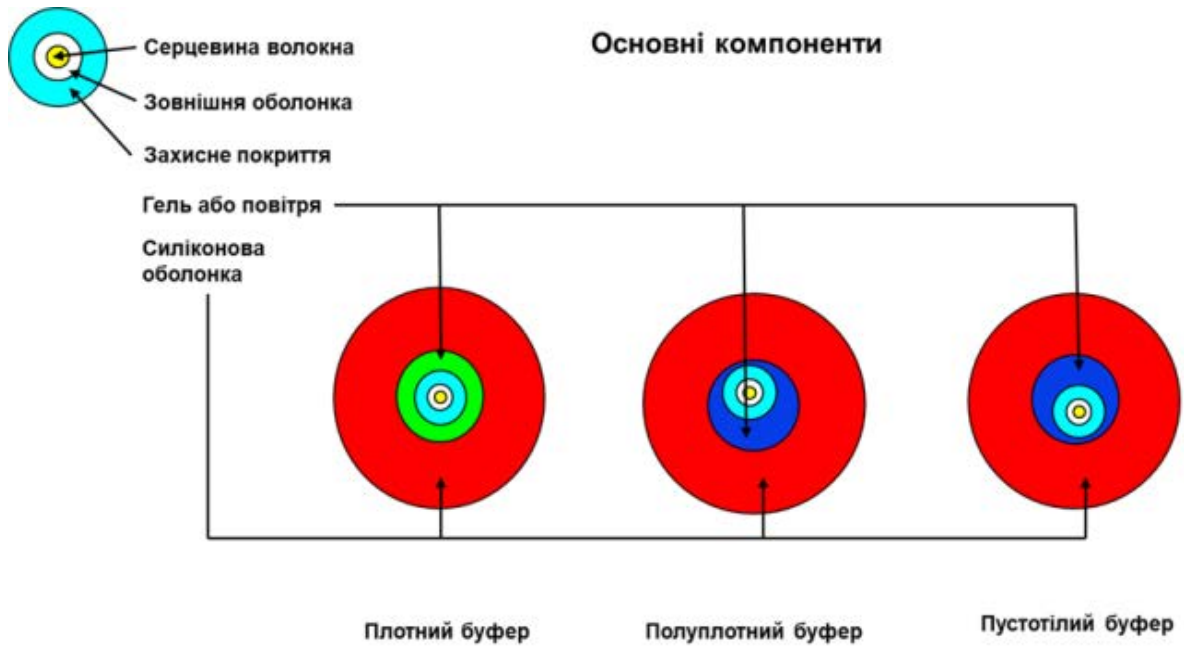
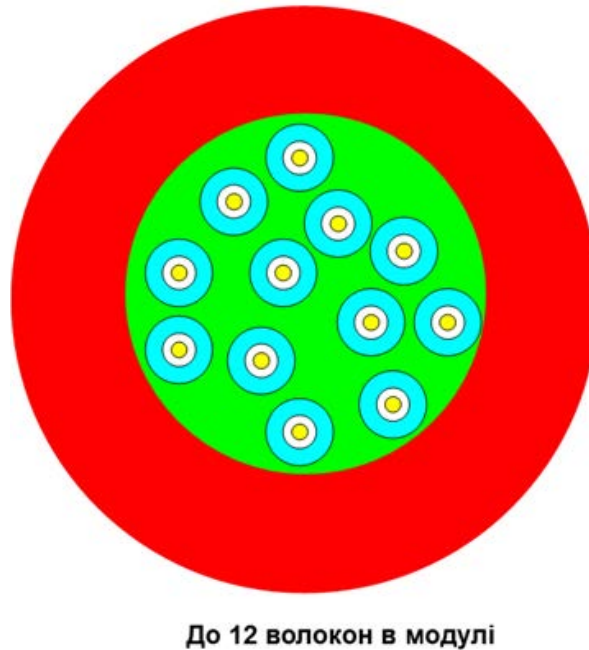


Рис. 3.6. Основні компоненти оптичного кабелю.

Конструкція представлена на рисунку вище називається модулем і схована в силіконову трубку/оболонку. В модуль (рис. 3.7.) може бути включено як одне оптичне волокно, так і декілька (наприклад: 12, 24, 36 волокон) в залежності від ємності кабелю та виробника.

**Геленаповнений модуль
Як кабельний елемент**



До 12 волокон в модулі

Рис. 3.7. Геленаповнений модуль як кабельний елемент.

В багатоволоконних кабелях волокна зібрані в модулі, а модулі, в залежності від конструкції та призначення кабелю, формуються під захисними (армуючими, бронюючими) елементами кабелю та під загальною оболонкою кабелю. В якості армуючих елементів кабелю можуть використовуватись кевларові або арамідні нитки, металева оплітка, стальний або пластиковий трос/пруток. Стальні/пластикові прутки також використовуються в якості несучого елемента конструкції – в цьому випадку кабелі називають самонесучими і вони можуть витримувати досить значні навантаження при підвісі кабелю на стовпах або опорах.

Буферна кабельна оболонка виконується з таких матеріалів як PVC, PE, PA.

Полівінілхлорид PVC (Polyvinyl Chloride) – це міцний, гнучкий та хімічно стійкий пластик, який широко використовується у виробництві кабелів.

Поліетилен PE (Polyethylene) – легкий та гнучкий термопластик, який має хорошу стійкість до хімічної корозії. Використовується у виробництві кабельних оболонок.

Поліамід (нейлон) PA (Polyamide) – це міцний та зносостійкий матеріал, який застосовується у виробництві кабельних оболонок.

До кабелів внутрішнього прокладання (рис. 3.8., 3.9.) відносять:

- Горизонтальні кабелі;
- Магістральні кабелі будівлі;
- Мікро кабелі (patch-cord, pig-tail).

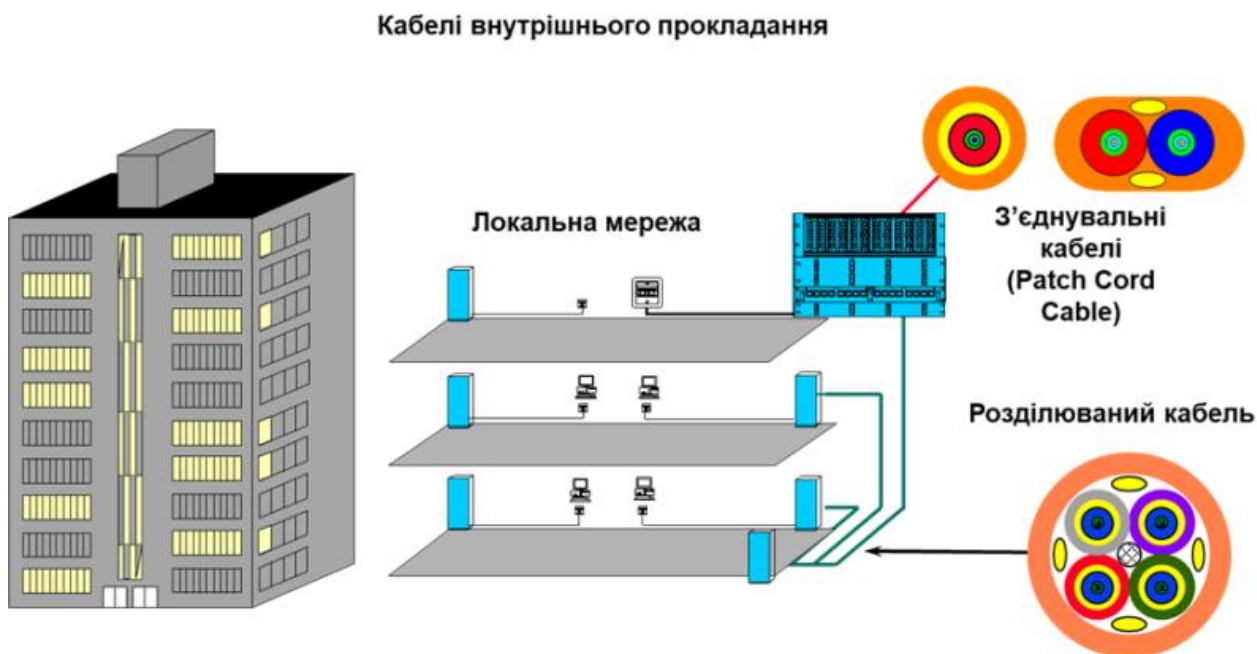


Рис. 3.8. Кабелі внутрішнього прокладання.

Розділюваний кабель – це тип оптичного кабелю, який має конструкцію, що дозволяє легко розділяти окремі волокна для подальшого монтажу або

підключення. Такий кабель часто використовується у випадках, коли необхідно швидко та зручно здійснити термінування волокон без додаткової обробки. Зазвичай розділювані кабелі мають щільне буферне покриття, яке забезпечує механічний захист кожного волокна, а також гнучку оболонку, що дозволяє зручно працювати з ними під час монтажу. Вони застосовуються у внутрішніх і зовнішніх мережах, зокрема для підключення до розподільчих панелей, серверних шаф або телекомунікаційних вузлів.

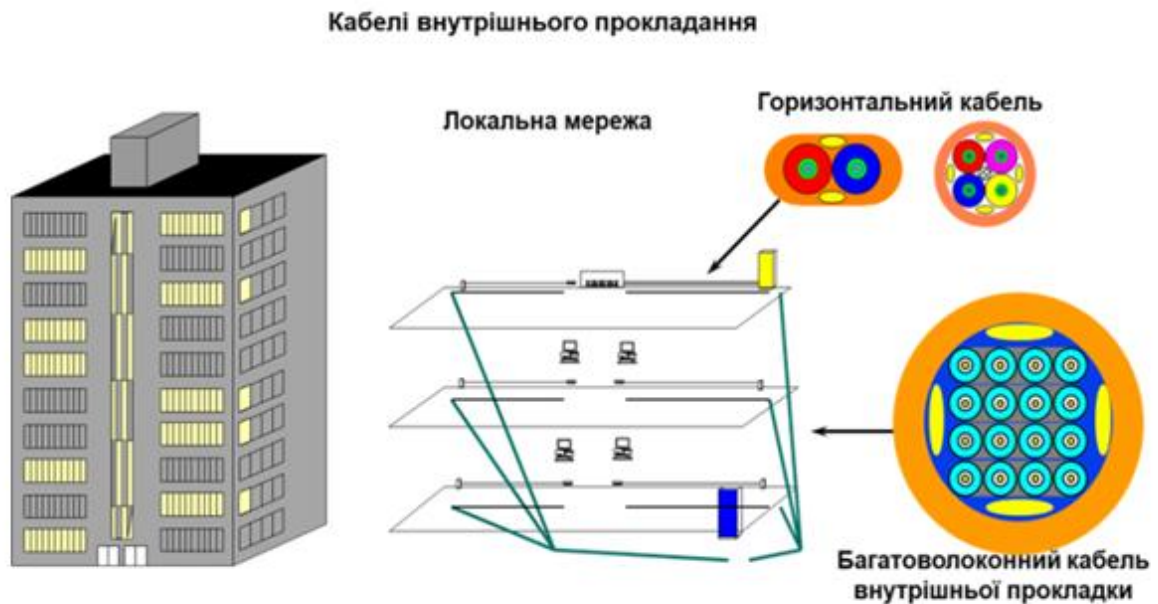


Рис. 3.9. Кабелі внутрішнього прокладання.

Кабелі зовнішнього прокладання (рис. 3.10. та 3.11) можна розділити на наступні категорії кабелів:

- *Повітряні (підвіска на опорах);*
- *Прокладка в ґрунт: броньовані кабелі та кабелі для укладання в пластикові труби;*
- *Прокладка по дну водойм.*

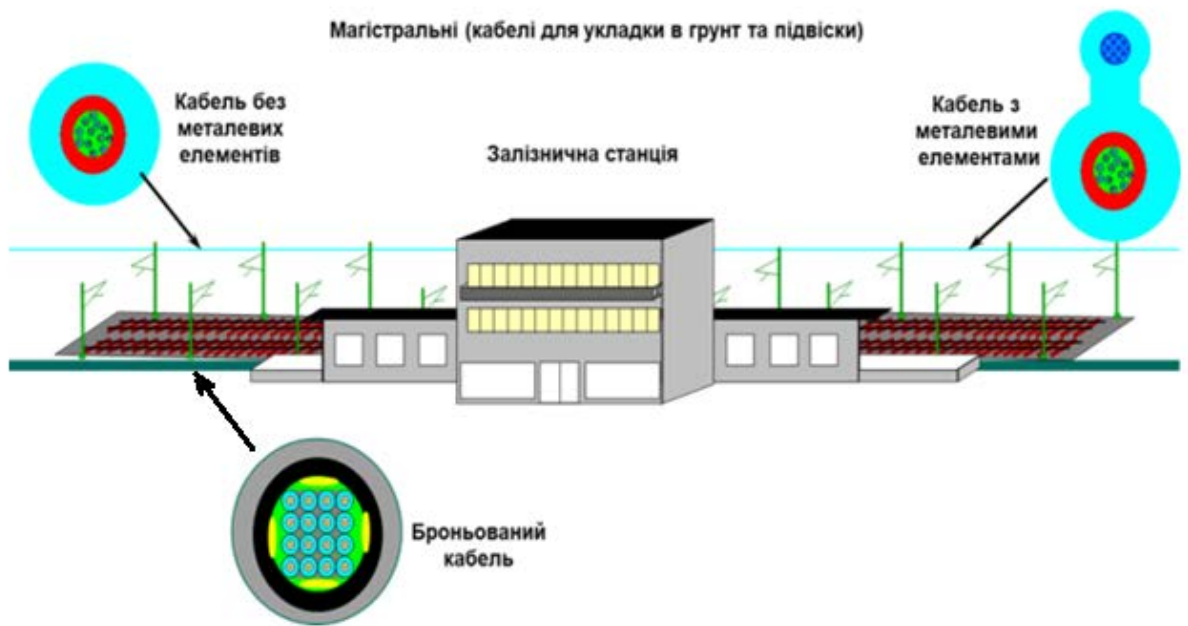


Рис. 3.10. Кабелі зовнішнього прокладання (підвісні та броньовані).

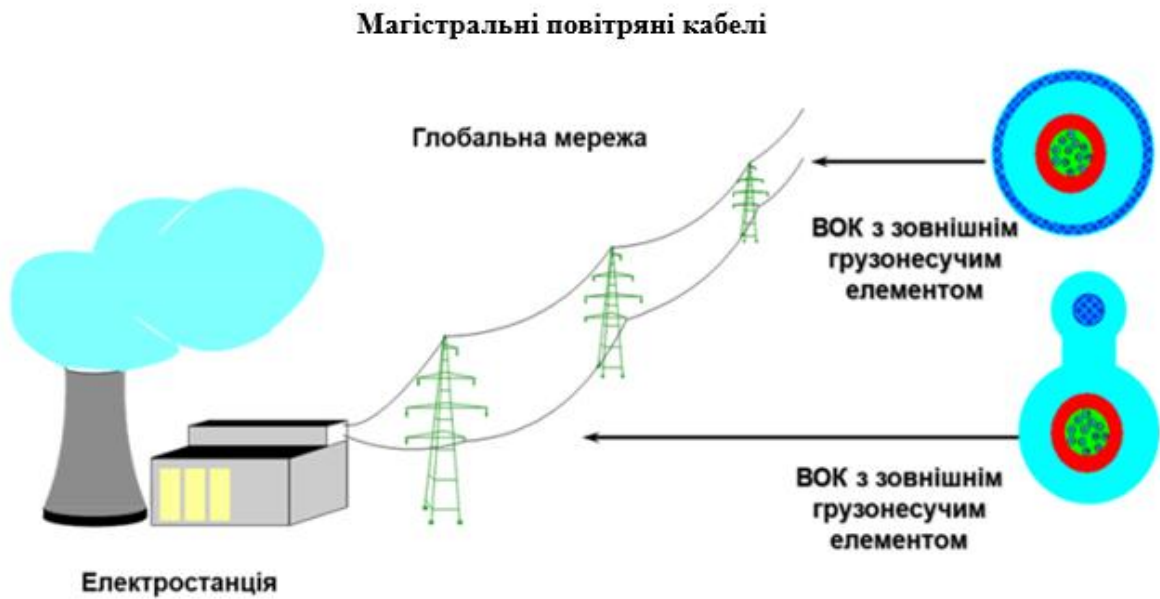


Рис. 3.11. Кабелі зовнішнього прокладання (з зовнішнім грузонесучим елементом).

Загальна схема використання різних типів кабелів показана на рис. 3.12.

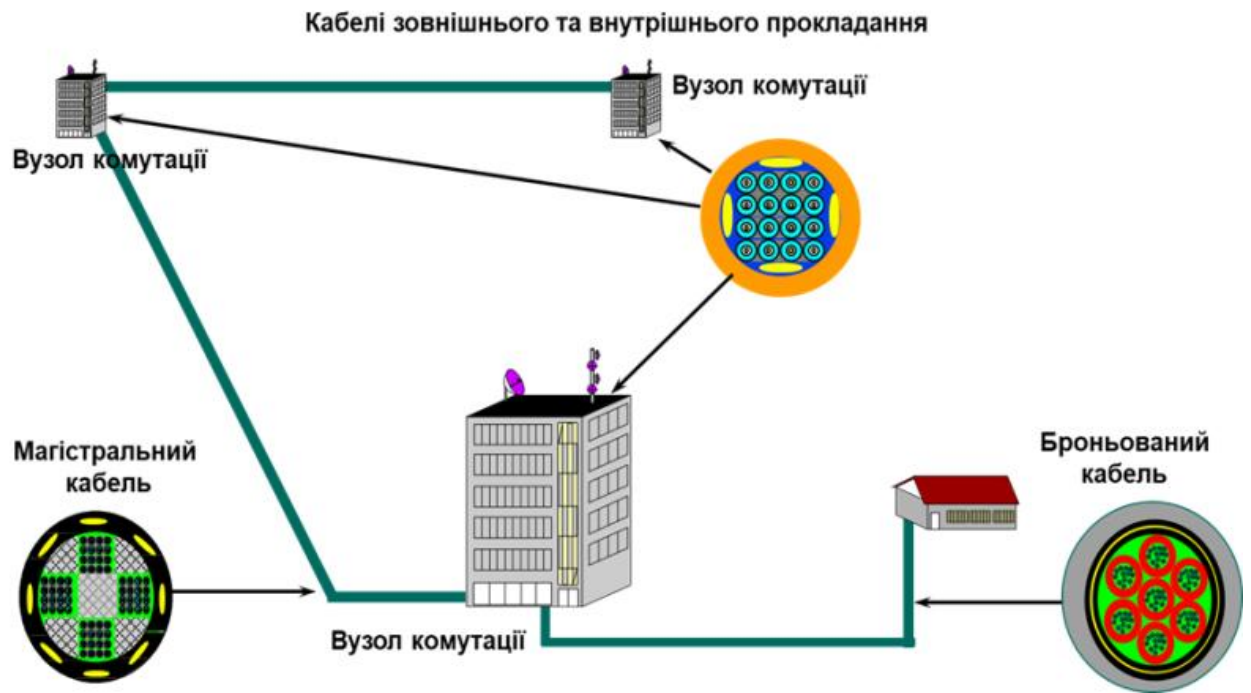
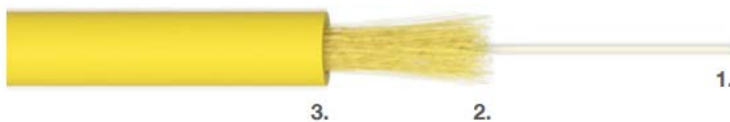


Рис. 3.12. Кабелі зовнішнього та внутрішнього прокладання.

Кілька прикладів виконання оптичного кабелю виробництва xtcmrj] компанії KDP (KABELOVNA Děčín Podmokly) показано на рис. 3.13 – 3.22.

SIMPLEX

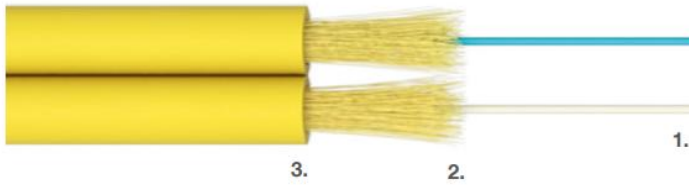


Description of materials:

1. FR-LSZH buffered optical fiber. 2. Waterblocking aramid yarn. 3. FR-LSZH outer jacket.

Рис. 3.13. Сімлексний патчкордовий кабель.

DUPLEX

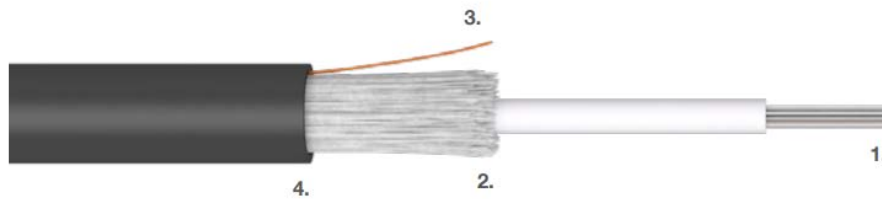


Description of materials:

1. FR-LSZH buffered optical fibers. 2. Waterblocking aramid yarn. 3. FR-LSZH outer jacket.

Рис. 3.14. Дуплексний патчкордовий кабель.

CLT IMPROVED

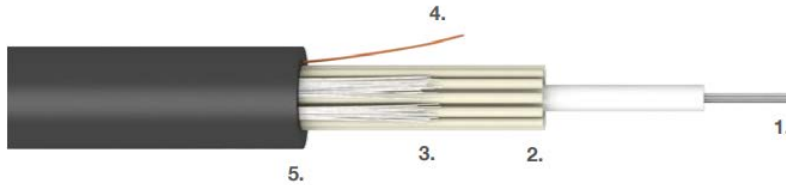


Description of materials:

1. Gel filled PBT loose tube with optical fibers. 2. Waterblocking E-glass yarn. 3. Rip-Cord. 4. FR-LSZH or PE outer jacket, UV stable.

Рис. 3.15. МногОВОЛОКОННИЙ кабель – волокна зібрані в центральному модулі.

CLT FRP

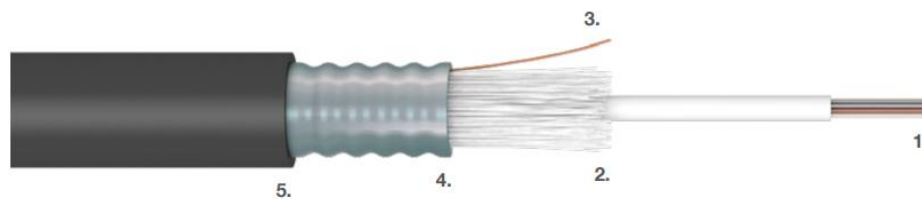


Description of materials:

1. Gel filled PBT loose tube with optical fibers.
2. FRP dielectric strength member.
3. Waterblocking E-glass yarn.
4. Rip-Cord.
5. FR-LSZH or PE outer jacket, UV stable.

Рис. 3.16. Многоволоконний кабель – волокна зібрані в центральному модулі. Кабель посилений армуючими пластиковими прутками.

CLT CST

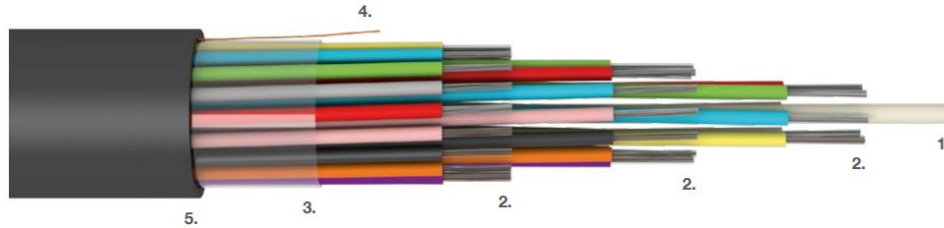
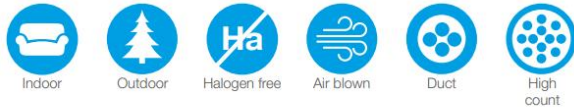


Description of materials:

1. Gel filled PBT loose tube with optical fibers.
2. Waterblocking E-glass yarn.
3. Rip-Cord.
4. Corrugated steel tape.
5. FR-LSZH or PE outer jacket, UV stable.

Рис. 3.17. Многоволоконний кабель – волокна зібрані в центральному модулі. Кабель посилений сталеву броню.

MLT STANDARD

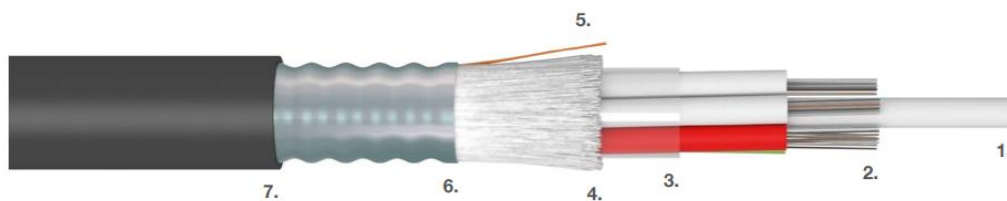


Description of materials:

1. FRP dielectric central strength member.
2. Gel filled PBT loose tube with optical fibres.
3. Water-swellable tape.
4. Rip-Cord.
5. FR-LSZH or PE outer jacket, UV stable.

Рис. 3.18. Многоволоконный кабель – волокна зібрані в модулях, розташованих навколо центрального склопластикового прутка (силової елемент).

MLT CST

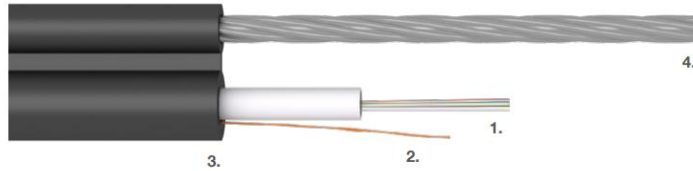


Description of materials:

1. FRP dielectric central strength member.
2. Gel filled PBT loose tube with optical fibres.
3. Water-swellable tape.
4. Waterblocking E-glass yarn.
5. Rip-Cord.
6. Corrugated steel tape.
7. FR-LSZH or PE outer jacket, UV stable.

Рис. 3.19. Многоволоконный кабель – волокна зібрані в модулях, розташованих навколо центрального склопластикового прутка (силової елемент). Додатково кабель захищено сталеву броню.

FIG.8

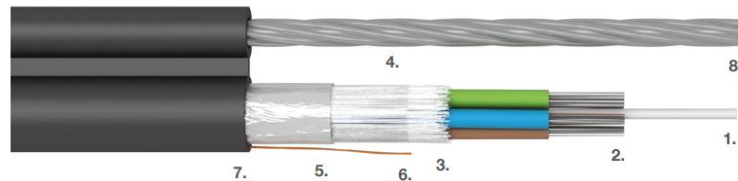


Description of materials:

- 1. Gel filled PBT loose tube with optical fibers.
- 2. Rip-Cord.
- 3. FR-LSZH or PE outer jacket, UV stable.
- 4. Steel wire messenger.

Рис. 3.20. Самонесучий многоволоконний кабель – волокна зібрані в модулі. Самонесучий елемент – сталевий трос.

FIG.8

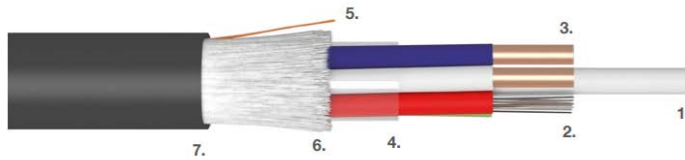


Description of materials:

- 1. FRP dielectric central strength member.
- 2. Gel filled PBT loose tube with optical fibers.
- 3. Waterblocking E-glass yarn.
- 4. Water-swellable tape.
- 5. Moisture barrier.
- 6. Rip-Cord.
- 7. PE outer jacket, UV stable.
- 8. Steel wire messenger.

Рис. 3.21. Самонесучий многоволоконний кабель – волокна зібрані в модулях, розташованих навколо центрального склопластикового прутка (силового елемента). Самонесучий елемент – сталевий трос.

HYBRID



Description of materials:

1. FRP dielectric central strength member.
2. Gel filled PBT loose tube with optical fibers.
3. Cu pair.
4. Water-swellable tape.
5. Rip-Cord.
6. Waterblocking E-glass yarn.
7. PE outer jacket UV stabile.

Рис. 3.22. Гібридний многоволоконний кабель – волокна зібрані в модулях, розташованих навколо центрального склопластикового прутка (силової елемент). Додатково в кабелі розташовані дві мідних жили для можливості подачі дистанційного живлення на віддалене обладнання.

3.2. Оптичні роз'єми

Найчастіше використовуваними типами роз'ємів є ST, FC (на старих системах), SC, LC, MPO/MTP

Конектори та адаптери ST.

Роз'єм ST (рис. 3.23.) в основному використовується у вимірювальних приладах, деякому спеціалізованому обладнанні, а також досить популярний на мережах залізниць. Перевагою конектора є поворотний механізм замку.

Цей тип роз'єму використовує байонетне з'єднання, що швидко з'єднується, але вимагає повороту роз'єму на чверть обороту для здійснення з'єднання/роз'єднання. Вбудований ключ забезпечує хорошу повторюваність параметрів з'єднання, тому що роз'єм завжди буде однаково з'єднаний із сполучною втулкою у прохідному адаптері (рис. 3.24.).



Рис. 3.23. Роз'єм ST.



Рис. 3.24. Адаптер ST.

Конектори та адаптери FC.

Роз'єм типу FC (рис. 3.2.5.) були розроблені компанією NTT і орієнтовані в основному на застосування в одномодових лініях телекомунікації, спеціалізованих системах і мережах кабельного телебачення.

Для фіксації конектора FC на адаптері (рис. 3.26.) використовується накидна гайка з різьбленням M8x0,75. У цій конструкції пружний наконечник жорстко не пов'язаний з корпусом і хвостовиком, що ускладнює та здорожчує конектор, проте таке доповнення окупається підвищенням надійності.

Конектори типу FC стійкі до впливу вібрацій та ударів, що дозволяє застосовувати їх на відповідних мережах, наприклад безпосередньо на рухомих об'єктах, а також на спорудах, розташованих поблизу залізниць.



Рис. 3.25. Роз'єм FC.



Рис. 3.26. Адаптер FC.

Конектори та адаптери SC.

Оптичні адаптери та конектори SC (рис. 3.27. та 3.28.) традиційно використовують у медіаконвертерах, оптичних трансиверах SFP, SFP+, GBIC, XENPAK (оптичні трансивери більш детально буде розглянуто в розділі 4.1), мережному обладнанні, розподільних панелях (ODF), мережах кабельного телебачення.

Одним з недоліків конекторів типів FC і ST вважається необхідність обертального руху при підключенні до адаптера.

Підключення та відключення конектора SC проводиться лінійно (push-pull), що оберігає наконечники конекторів від прокручування один щодо одного в момент фіксації в адаптері. Фіксуючий механізм відкривається тільки при витягуванні конектора за корпус.

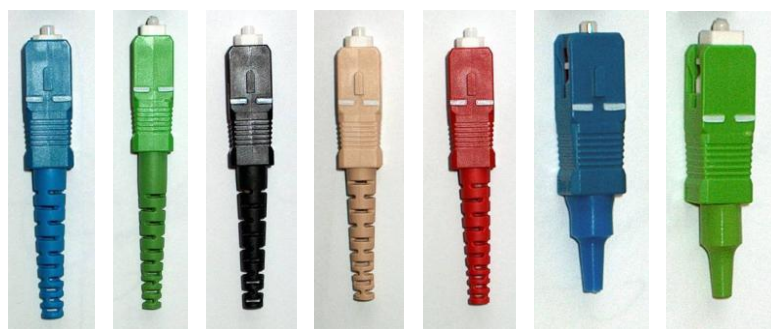


Рис. 3.27. Роз'єм SC.

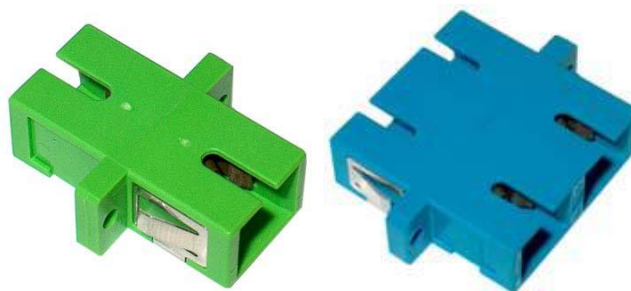


Рис. 3.28. Адаптери SC – Simplex та Duplex.

Конектори та адаптери LC.

Найбільш поширений тип оптичного конектора та адаптера – LC (рис. 3.29. та 3.30.). Перевага роз'єму у малих розмірах. Традиційно використовується в оптичних приймачах-передавачах (трансиверах), деякому мережному обладнанні, а також у розподільчих панелях, де потрібна висока щільність оптичних портів.

Конструкція конектора порівняно проста: керамічний сердечник діаметром 1,25 мм, не пов'язаний із пластмасовим корпусом. Механізм фіксації – клямка (аналогічно RJ-45). Пара конекторів легко поєднується в дуплекс за допомогою спеціальної кліпси.



Рис. 3.29. Роз'єм LC.

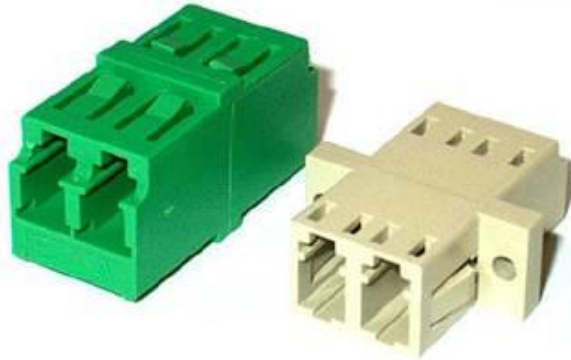


Рис. 3.30. Адаптер Duplex LC.

Конектори та адаптери MPO/MTP.

Конектори MPO (Multi-Fiber Push-On) та MTP (Mechanical Transfer Push-On) використовуються для високошвидкісних оптичних з'єднань, особливо в дата-центрах та телекомунікаційних мережах. Вони дозволяють підключати кілька оптичних волокон через один конектор, що значно підвищує пропускну здатність.

Основні особливості:

- MPO (рис. 3.31.) – це стандартний багатоволоконний конектор, який може мати 4, 8, 12, 24 і більше волокон.
- MTP (рис. 3.32.) - це вдосконалена версія MPO, розроблена компанією US Cones. Конектор має покращену механічну конструкцію та оптичні характеристики.

Відмінності між MPO та MTP:

- Металевий фіксатор у MTP замість пластикового в MPO, що зменшує ризик пошкодження.
- Плаваюча ферула у MTP забезпечує кращу стабільність з'єднання.
- Овальні напрямні штифти у MTP зменшують ризик пошкодження при підключенні.
- Знімний корпус у MTP дозволяє легко змінювати конфігурацію конектора.

Ці конектори широко використовуються для мереж 40G, 100G і навіть 800G, забезпечуючи високу щільність підключень та швидкість передачі даних.

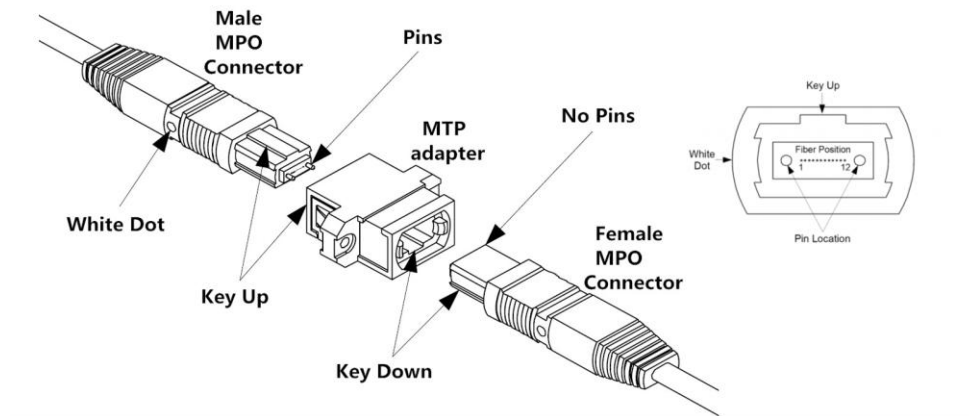


Рис. 3.31. Конектор та адаптер MPO.

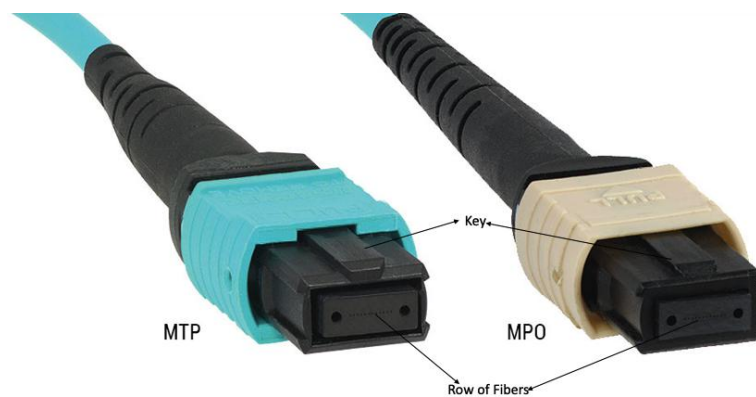


Рис. 3.32. Конектори MTP та MPO.

Рідше використовуються наступні типи конекторів MT-RJ, E2000/LSH, SMA, LX5, MU, ESCON, FDDI, DIN.

Роз'єми MT-RJ (рис. 3.33. та 3.34.) розроблені консорціумом виробників у складі AMP, Hewlett-Packard, Sincor LIN, Fujikura та US Cones. Ці конектори виготовляються виключно у вигляді дуплексних пар і тому не можуть вважатися універсальними. Технологічно вони складні у виробництві.

Корпус конекторів містить пару металевих напрямних, в конекторі попередньо встановлено два оптичних волокна. Оптичні волокна кабелю підварюються до встановлених волокон. Після встановлення кабель фіксується поворотом замикаючого ключа.

Конектори типу MT-RJ застосовувались в комутаторах, концентраторах та маршрутизаторах багатьма провідними виробниками обладнання.



Рис. 3.33. Конектори типу MT-RJ.



Рис. 3.34. Адаптери MT-RJ.

Конекторита адаптери E-2000.

У конекторах типу E-2000 реалізована одна з найскладніших конструкцій. Підключення та відключення конектора здійснюється лінійно (push-pull). Фіксуючий механізм відкривається тільки при витягуванні конектора за корпус із застосуванням спеціальної вставки-ключа. Випадкове вимкнення такого конектора без використання ключа практично неможливе (тобто необхідне навантаження для руйнування клямки корпусу конектора).

Основне нововведення – пластмасові шторки, що виконують функцію заглушок при відключенні від адаптера. Вони також служать для запобігання попаданню пилу на площину оптичного контакту.

Цей тип конекторів та адаптерів (рис. 3.35. та 3.36.) відрізняється покращеними оптичними показниками та стабільними характеристиками, а також високою надійністю (гарантовано не менше 2 тис. циклів включення-вимкнення). Перетин корпусу - квадратний, що дозволяє легко реалізувати дуплексні конектори.



Рис. 3.35. Конектори E-2000.

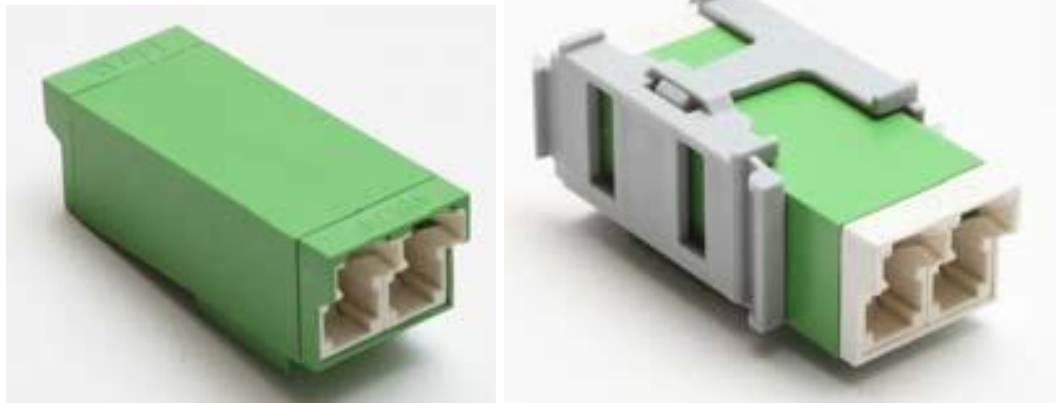


Рис. 3.36. Адаптери E-2000.

Про конектори та прохідні адаптери (каплери) треба запам'ятати, що у них, як і патч кордах, є колорове маркування: всі конектори та адаптери з маркуванням синього кольору призначені для одномодових з'єднань, тип полірування – PC, SPC, UPC; всі конектори та адаптери з маркуванням зеленого кольору призначені для одномодових з'єднань, тип полірування – APC; конектори та адаптери з маркуванням сірого (бежевого) кольору призначені для многомодових з'єднань, тип полірування – PC, SPC, UPC.

На конекторах типу ST, FC, MT-RJ, MPO/MTP – треба дивитись на колір хвостовика (рис. 3.37.) та на позначення на упаковці для того щоб зрозуміти це одномод чи многомод.



Рис. 3.37. Приклад маркування хвостовика на конекторі FC.

І підключати патч корди треба на кросах відповідно до кольорового маркування – зелені конектори тільки в зелені адаптери, сині конектори тільки в сині адаптери, сірі (бежеві) конектори тільки в бежеві адаптери (зрозуміло, що з урахуванням типу конектора та типу адаптера).

Про типи полірування ми поговоримо в наступному розділі.

3.2.1. Типи полірування

На сьогоднішній день існує 4 типи поліровок: PC, SPC, UPC, APC.

PC полірування використовується в системах, які працюють на невеликих відстанях. Насамперед це невеликі комп'ютерні мережі. Спочатку при даному типі полірування використовували плоский наконечник конектора. Згодом його замінили більш закругленим, оскільки зовсім плоский торець не було виключити утворення повітряних зазорів.

Існує кілька видів оптичних конекторів з різною геометрією торця керамічної серцевини (ферула) - Dome, Cone та Angle (рис. 3.38.). Принципову різницю між ними можна побачити на наступному рисунку.

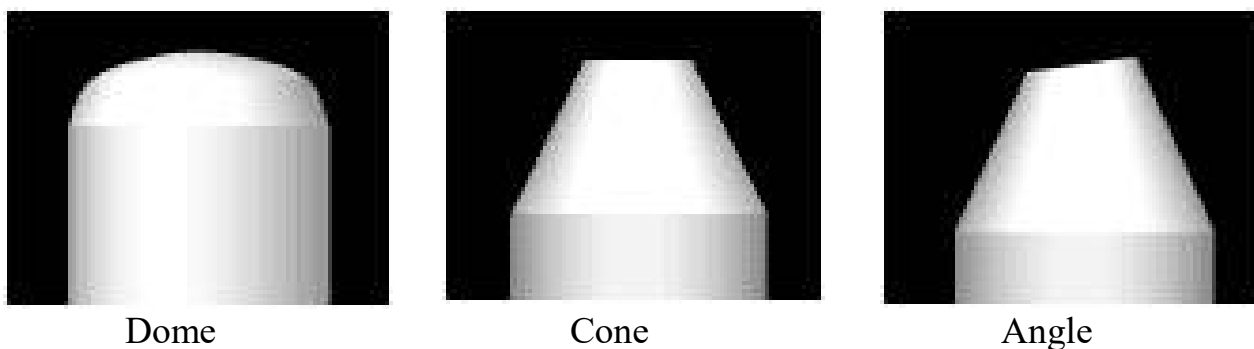


Рис. 3.38. Типи фферула.

Для зменшення зворотних втрат конектор може бути відполірований на спеціальній автоматичній машині до поліровки SPC (Super Physical Contact) або UPC полірування (Ultra Physical Contact). Такий тип полірування також забезпечує використання конекторів з фферулом закругленої форми. Як визначено стандартом IEC 61300, значення зворотних втрат для SPC полірування не повинно перевищувати -45 дБ, а для UPC -50 дБ. Таких параметрів неможливо досягти в польових умовах при монтажі конекторів клейовим способом. Параметри досягаються виключно при виробництві в заводських умовах на спеціалізованому обладнанні – полірувальних машинах (рис. 3.39.), а при поліровці UPC такі машини повинні ще враховувати радіус закруглення конектора. В процесі виробництва використовуються пічка (рис. 3.40.) для просушки конекторів з волокном, ручний сколювач волокна з рубіновим або сапфіровим лезом (рис. 3.41.), машинка для полірування, плашки під кожний тип конекторів (рис. 3.42.) та спеціальні полірувальні плівки (рис. 3.43.) різної зернистості (зернистість плівок від 20 мкм до 0,5 мкм).



Рис. 3.39. Полірувальна машинка для конекторів.



Рис. 3.40. Сушильна пічка.



Рис. 3.41. Ручний зколювач з рубіновим лезом.



Рис. 3.42. Плашка для конекторів SC/APC.



Рис. 3.43. Набор спеціальних полірувальних плівок.

Типи полірування PC, SPC та UPC сумісні між собою, оскільки у всіх них не йдеться про полірування під кутом.

Якщо потрібно ще більше зменшити зворотні втрати, застосовується APC полірування (*Angled Physical Contact*). Торець керамічної серцевини, в конекторах з APC поліруванням, виконаний з нахилом під кутом 8-12°. Такі конектори традиційно маркуються зеленим кольором. Значення зворотних втрат (Return Loss) при APC поліруванні, згідно зі стандартом, не повинно перевищувати -60 дБ. За рахунок цього кута практично весь відбитий сигнал залишає межі світловода (рис. 3.44.). Вищі значення означають менші втрати на зворотне відбиття, тобто кращу якість з'єднання. Таке полірування найчастіше використовується в мережах кабельного телебачення, PON-мережах та високошвидкісних DWDM системах.

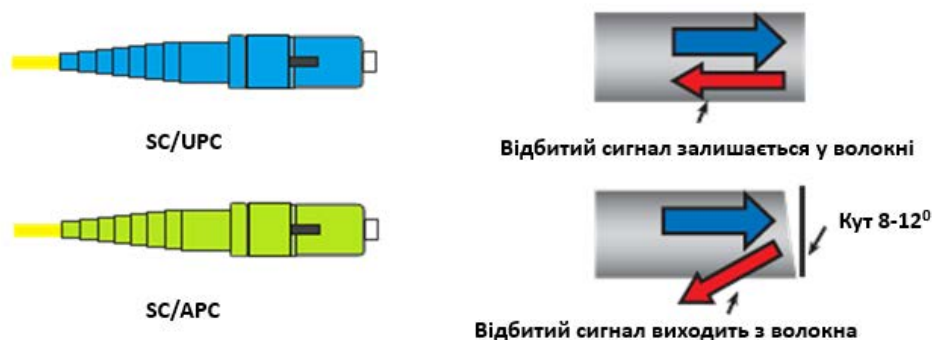


Рис. 3.44. Відбиття сигналу при поліруванні UPC та APC.

3.2.2. Якість з'єднання

Оптичні втрати з'являються у кожному з'єднанні. Їх походження можна пояснити різними властивостями волокон, що зрощуються (внутрішні ефекти) і недосконалої геометрії з'єднання (зовнішні ефекти). Внутрішні ефекти виникають за рахунок явищ, показаних на рис. 3.45.

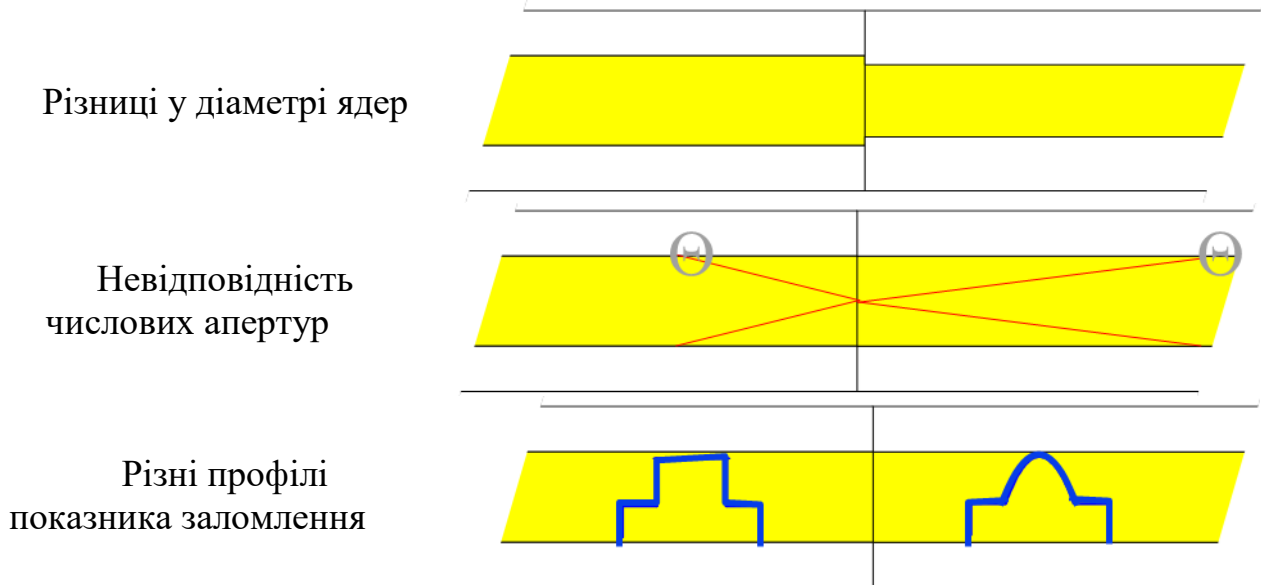


Рис. 3.45. Явища, за рахунок яких виникають внутрішні ефекти.

Зовнішні ефекти у зрощуванні наступні, що показані на рис. 3.46.

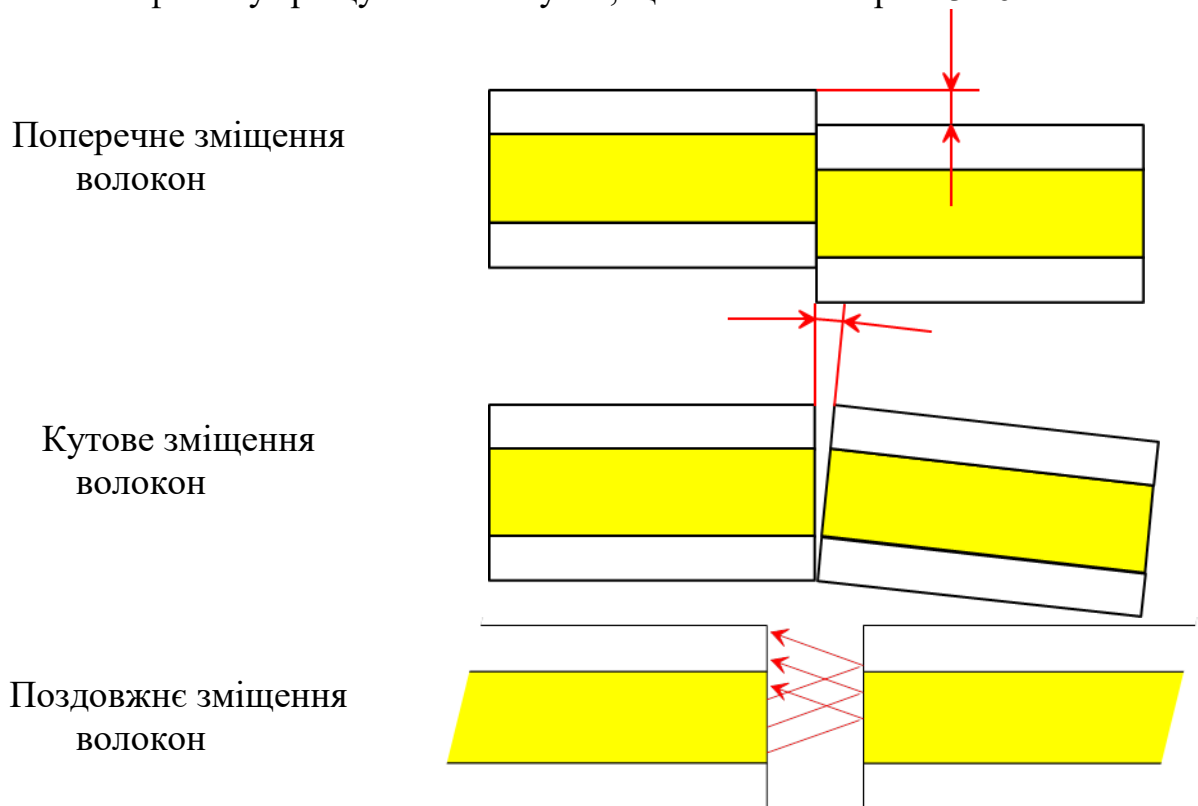


Рис. 3.46. Зовнішні ефекти у зрощуванні.

3.3. Оптичні кроси (ODF)

Оптичний розподільчий пристрій (Optical Distribution Frame), оптична патч-панель або оптичний бокс (оптичний крос) – це важливий компонент для організації оптоволоконних мереж, який відіграє ключову роль у забезпеченні ефективності, надійності та зручності комунікаційних систем. Давайте розглянемо його функції, конструкцію і застосування більш детально:

Основні функції оптичного кроса.

Захист. Кабелі в оптичному кросі укладаються в спеціальні секції, що захищають їх від механічних пошкоджень і впливу навколишнього середовища. Забезпечується організоване укладання, щоб уникнути переплутування чи заломів волокон.

Комутація. ODF дозволяє підключати і комутувати різні оптоволоконні лінії між собою або з іншими мережевими пристроями. Оптичний крос використовується для конфігурації/переконфігурації мережі, додавання нових вузлів чи заміни існуючих. Також забезпечує проведення технічних робіт, включаючи діагностику несправностей чи модернізацію мережі.

Схематичне розташування оптичних кросів та боксів показано на рис. 3.47.

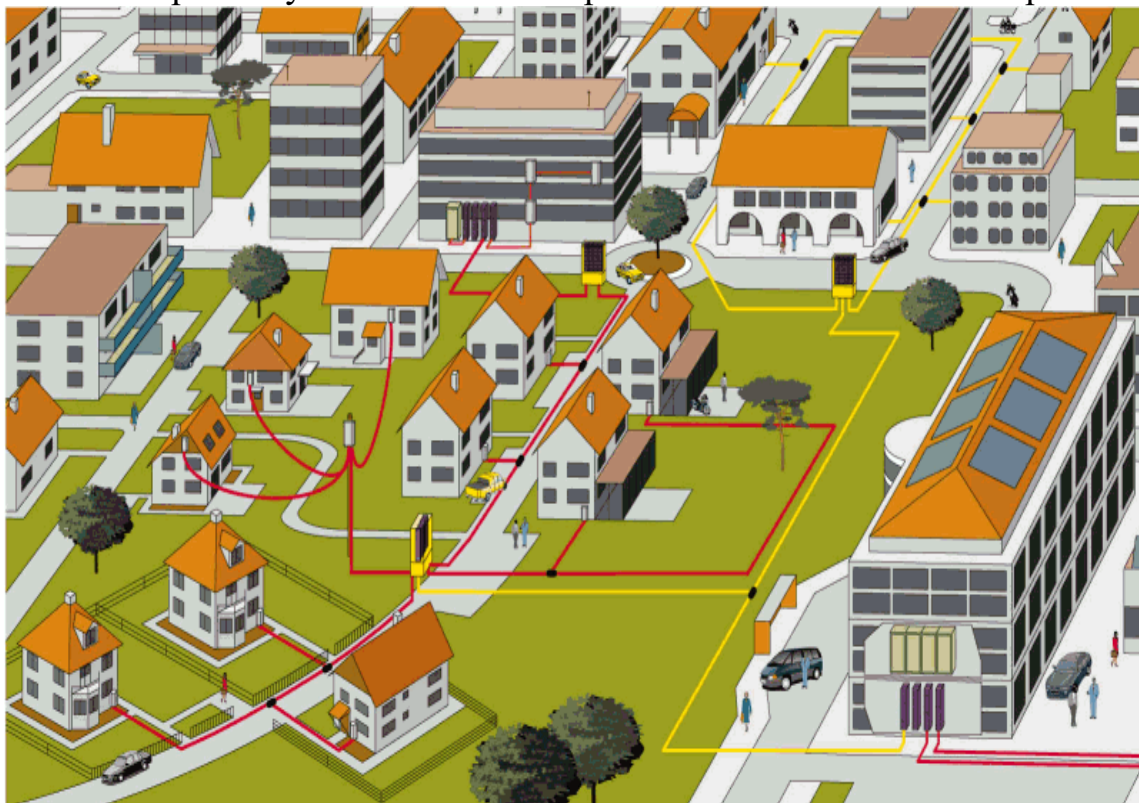


Рис. 3.47. Схематичне розташування оптичних кросів та боксів.

Як правило, ODF складається з наступних елементів: корпус (металевий або пластиковий, який служить основою для установки в телекомунікаційні шафи або стійки); адаптери (встановлюються в панелях і забезпечують з'єднання оптоволоконних кабелів з іншими пристроями, адаптери можуть бути різних типів, наприклад, LC, SC або ST); сплайс-касети (використовуються для

з'єднання волокон між собою та забезпечують захист зварних з'єднань); лотки для укладання (місце для надлишкової довжини оптоволоконного кабелю – технологічний запас, що забезпечує зручність в роботі з волокном).

Традиційно в телекомунікаціях використовуються стійки та шафи 19 або 21 дюйм шириною, рідше 23 дюйми шириною. Все телекомунікаційне обладнання розраховано для розміщення в них. Для вимірювання висоти обладнання в стійках та шафах прийнято використовувати термін юніт, наприклад, 1U – висота одного сервера чи патч-панелі.

Юніт (U, Unit) – це одиниця висоти в стійках і шафах, що дорівнює 44,45 мм (1,75 дюйма).

Стойки – це металеві конструкції для розміщення мережевого обладнання. Стандарт 19 дюймів (482,6 мм) найпоширеніший, використовується для серверів, роутерів та іншого обладнання. Стойки 21 дюйм (533,4 мм) рідше застосовуються, переважно для специфічного обладнання, наприклад, у телекомунікаціях або аудіоіндустрії. Вони бувають одно- або дворамними, відкритими або з панелями, і мають висоту від 8U до 48U.

Телекомунікаційні шафи – це закриті стойки з дверима для захисту обладнання. Стандарт 19 дюймів домінує, забезпечуючи безпеку та охолодження. Шафи 21 дюйм менш поширені, але підходять для нестандартного обладнання. Вони можуть бути настінними чи підлоговими, з висотою від 4U до 46U.

Більшість моделей ODF мають в передній (лицьовій) частині отвори для встановлення змінних лицьових панелей, розрахованих для встановлення адаптерів різного типу (FC, ST, SC, SCduplex). В залежності від виробника, в панелі висотою 1U може встановлюватися до трьох лицьових панелей. Якщо ємність ODF використовується не повністю, то замість лицьових панелей можливо поставити панелі-заглушки.

На деяких варіантах ODF посадочні місця для встановлення адаптерів розташовані під кутом 45° по відношенню до лицьової частини, що дозволяє уникнути різких перегинів патчкордів та збільшити кількість адаптерів на лицьовій панелі. Металева або пластикова полиця (організатор патч кордів), яка кріпиться до лицьової частини патч-панелей спростить організацію та кріплення патч кордів, що виводяться з передньої частини ODF.

За конструктивним виконанням більшість патч-панелей виконано під установку в стандартну 19-дюймову телекомунікаційну підлогову/настінну шафу або стойку та призначені для експлуатації у приміщеннях (рис. 3.48. - 3.50). Є моделі оптичних кросів для розташування в 21-дюймових телекомунікаційних шафах. До стойки оптичний крос кріпиться за допомогою кронштейнів (які називають «вуха»).

Крім того випускаються оптичні кроси з доступом до сплайс-касета з фронтального боку. Висувна монтажна панель спростить діагностику, обслуговування та проведення маніпуляцій з оптичними волокнами.



Рис. 3.48. Оптичний крос (ODF) висотою 1U для стійки 19 дюймів.



Рис. 3.49. Оптичний крос (ODF) висотою 3U для стійки 19 дюймів.

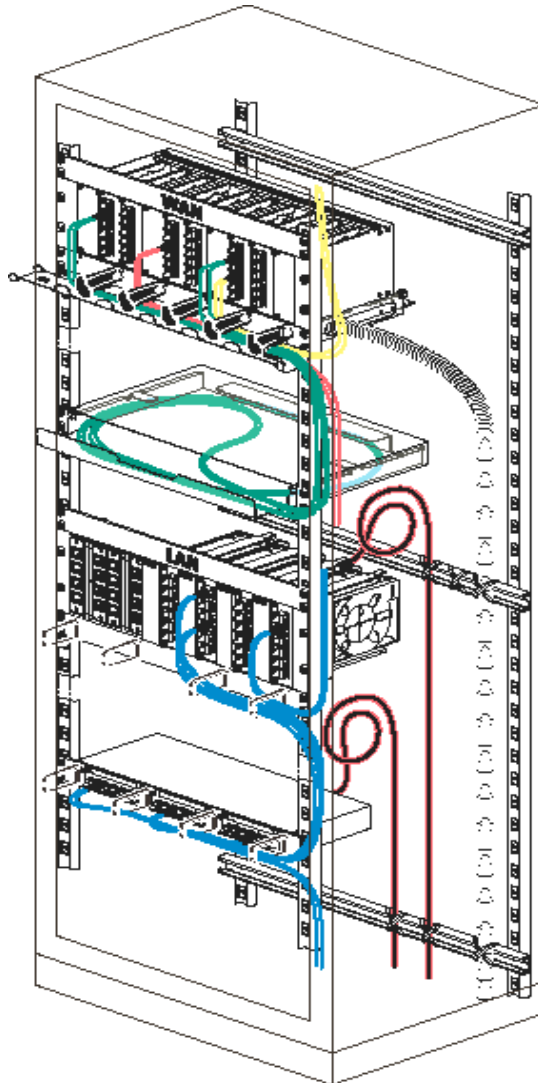


Рис. 3.50. Оптичні кроси (ODF) з різною висотою для стійки 19 дюймів.

У разі необхідності використовувати невеликі оптичні кроси по за межами серверних кімнат, використовують так звані оптичні бокси. Оптичні бокси можуть бути як внутрішнього (підзди, технічні приміщення будівель) так і зовнішнього (стіни будівель, кабельна каналізація, стовпи та опори) використання.

Бокси внутрішнього використання називаються indoor (рис. 3.51.). А на рис. 3.52. показана внутрішня компоновка боксу – сплайс-касети та панелі для встановлення оптичних прохідних адаптерів.

Бокси зовнішнього (вуличного) використання називаються outdoor і вони робляться, як правило, герметичними (рис. 3.53.). Компоновка таких боксів ідентична боксам внутрішнього розташування, єдине що всі кабелі вводи та дверцята додатков герметизуються.



Рис. 3.51. Оптичний бокс (ODF) для внутрішнього розташування.

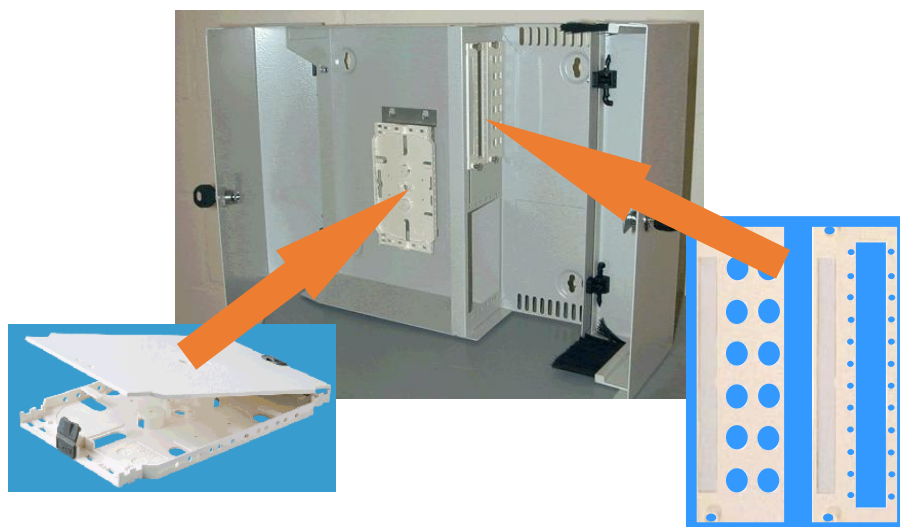


Рис. 3.52. Оптичний бокс (ODF) та внутрішня компоновка.

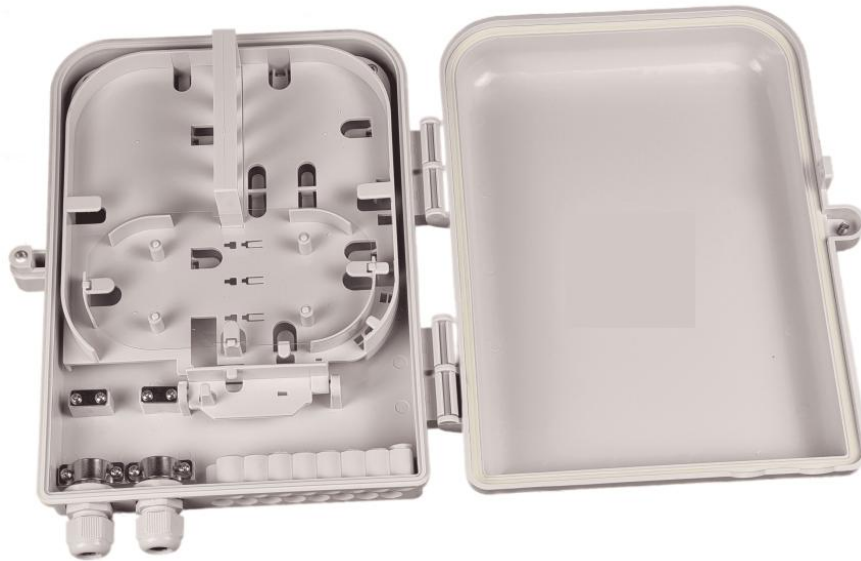


Рис. 3.53. Оптичний бокс (ODF) для зовнішнього розташування.

3.4. Оптичні муфти

Для забезпечення ефективної роботи волоконно-оптичних ліній зв'язку важливо не тільки правильно прокладати кабелі, але і правильно проводити з'єднання між собою кабелів на різних ділянках. Зазвичай кабель постачається на барабанах (або котушках). Найбільш розповсюджена довжина на одному барабані – 3-5 км. Але зустрічаються і барабани до 10 км, залежно від проекту та виробника.

Надійність системи та якість з'єднань досягаються завдяки використанню спеціальних оптичних муфт. Ці пристрої захищають місця з'єднання волокон від впливу зовнішніх факторів, таких як перепади температур, механічні пошкодження, вібрації та волога.

Оптичні муфти не лише забезпечують захист, але й дозволяють організовувати розгалуження кабельних ліній. Вони широко застосовуються під час прокладання зовнішніх ліній зв'язку, де потрібне надійне з'єднання кабелів.

Сучасні оптичні муфти класифікуються за конструкцією та функціональністю. Основними типами є:

- Прохідні муфти (рис. 3.54. – 3.56.): оснащені двома кабельними входами, розташованими з протилежних сторін корпусу, один із яких можна закрити заглушкою.

- Тупикові муфти (рис. 3.57. та 3.58.): мають кабельні входи для введення й виведення кабелів з однієї сторони. Вони найпоширеніші та дозволяють з'єднувати кілька кабелів одночасно.

- Розгалуджуючі муфти: можуть бути як прохідними, так і тупиковими – мають один великий ввід, та кілька менших виводів.



Рис. 3.54. Прохідна муфта.

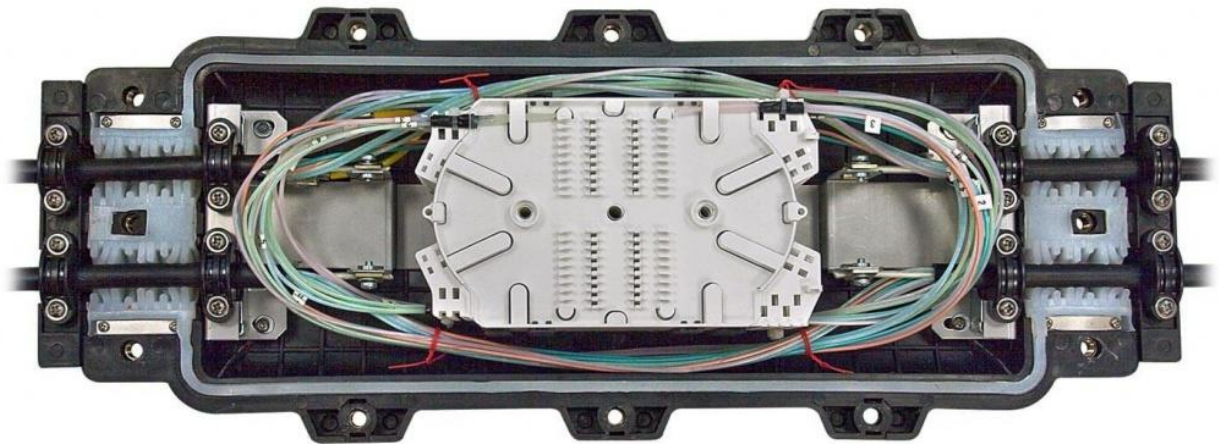


Рис. 3.55. Прохідна муфта в середині.

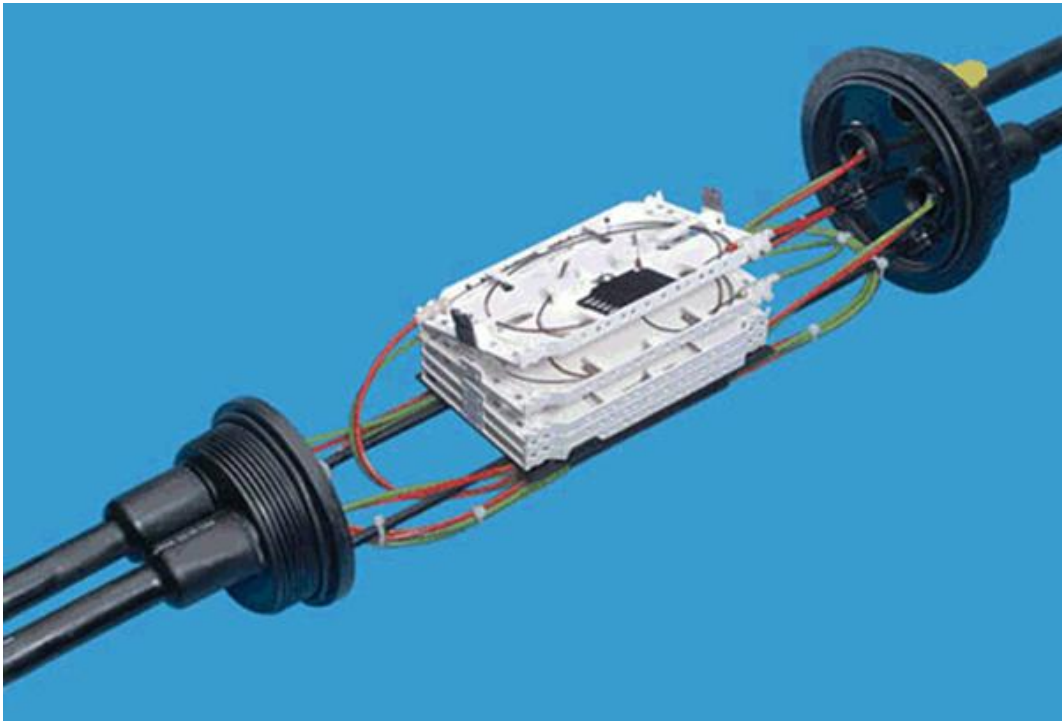


Рис. 3.56. Прохідна муфта в розібраному стані зі знятим захисним кожухом.



Рис. 3.57. Тупікова муфта.

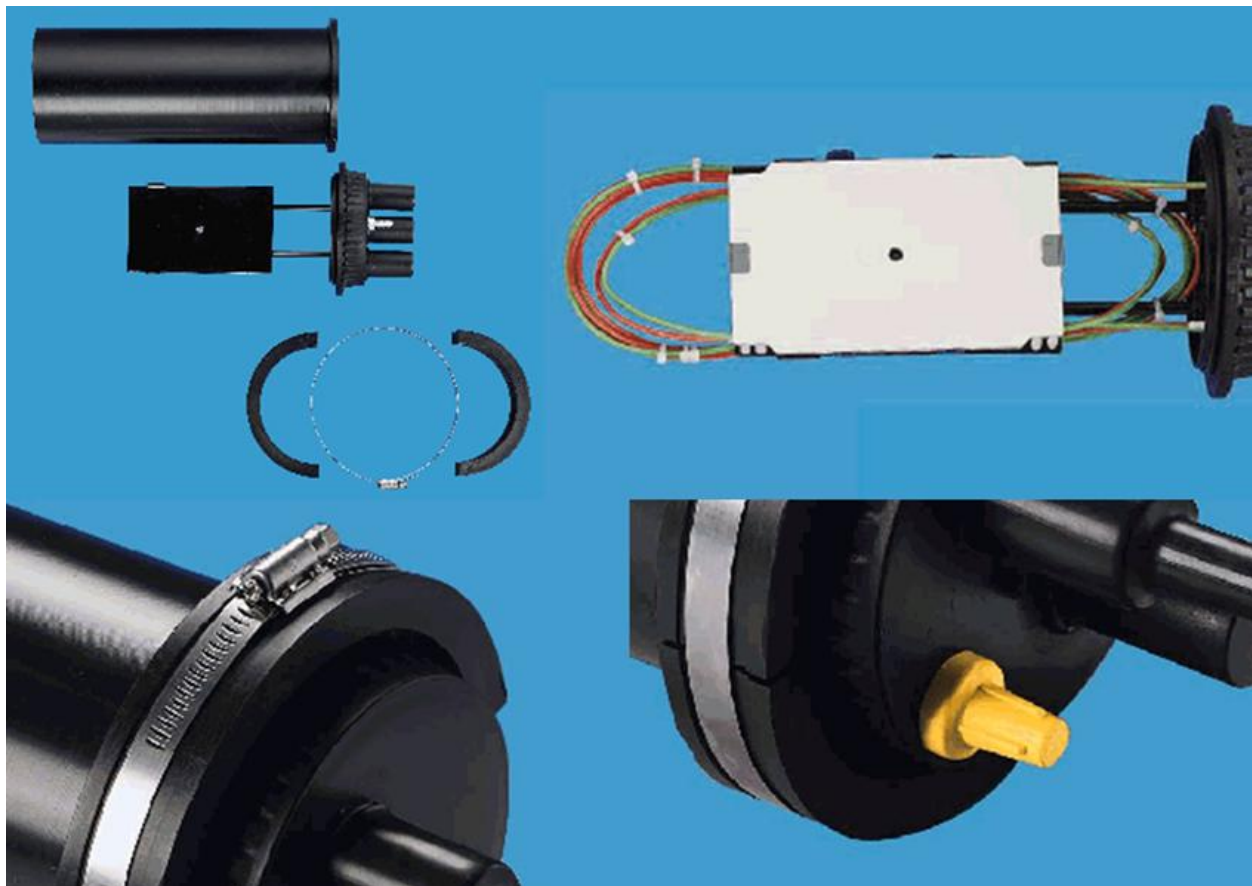


Рис. 3.58. Тупікова муфта в розібраному стані.

Оптичні муфти виконують кілька функцій. Їх використовують для захисту та герметизації кабельних з'єднань, а також комутації обладнання. Завдяки цим пристроям можна легко організувати додаткові підключення до системи.

Основні елементи оптичних муфт – це корпус з кабельними вводами, сплайс-касети, гвинти або хомути для з'єднання частин корпусу між собою та сплайс-касети. Багато муфт можуть додатково накачуватись повітрям (утримуються під надлишковим тиском) для забезпечення додаткової герметезації – жовтий ніпель на рис. 3.58.

Широке застосування оптичних муфт охоплює ґрунтові кабельні траси, кабельні колектори, тунелі, електроопори, а також повітряні лінії зв'язку (рис. 3.59.). Універсальні моделі дозволяють забезпечити надійність і багатофункціональність при з'єднанні різних типів кабелів. Приклади застосування муфт на електроопорах наведені на рис. 3.60.

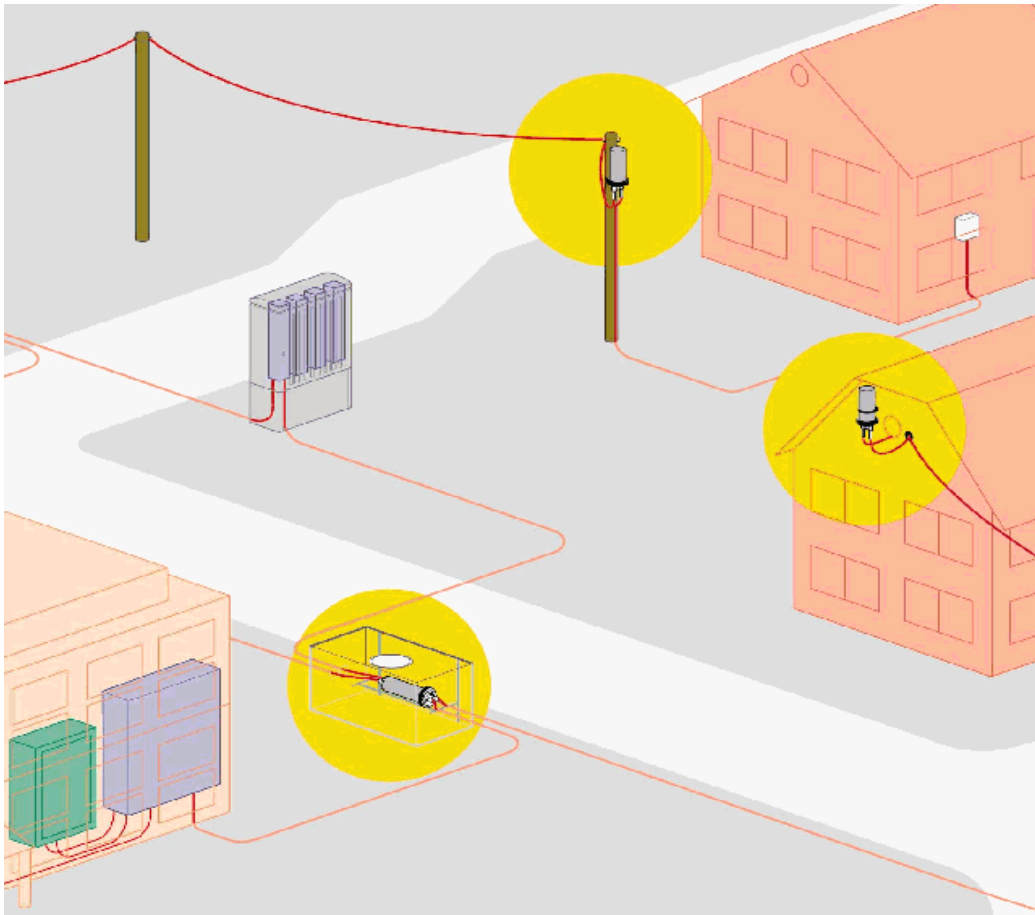


Рис. 3.59. Місця установки та типи оптичних муфт.



Рис. 3.60. Оптичні муфти встановлені на електроопорі.

3.5. Патчкорди та пігтейли

Пігтейл (3.61.) – відрізок оптичного з'єднувального шнура з оптичним конектором з одного боку. Традиційно пігтейли виробляються невеликої довжини з буферизованого волокна в оболонці 900 мкм. Пігтейл може бути оснащений оптичним конектором будь-якого типу, як для одномодових (Singlemode), так і багатомодових (Multimode) систем. Основне призначення оптичних пігтейлів – оконцовка оптичного кабелю методом зварювання або механічного з'єднання в оптичних розподільних панелях (ODF).

Патч корд (рис. 3.62.) – відрізок оптичного з'єднувального шнура оснащений оптичними конекторами з обох боків. Довжина оптичного кабелю в патч корді може становити від 1-го до 100 і більше метрів в залежності від потреби. Оптичні патч корди виготовляються із одноволоконного (симплексного) або двоволоконного (дуплексного) оптичного кабелю. Традиційно оптичні патч корди використовуються для комутації оптичних лінків усередині розподільчих панелей, а також для підключення активного мережного обладнання до розподільчої панелі, оптичного боксу.



Рис. 3.61. Оптичні пігтейли – з пігтейлового та патчкордового кабелю.



Рис. 3.62. Оптичні патч корди.

Якщо ви бачите патч корд з оболонкою жовтого кольору, синіми конекторами LC, то це одномодовий патч корд з конекторами LC та типом полірування (скоріше за все) UPC і на упаковці якого буде написано Patch cord LC/UPC – LC/UPC SM (або E9, або 9/125, або Singlemode, або тип волокна згідно стандарту, наприклад G652D), вказано симплексний (Simplex, SX) це чи дуплексний (Duplex, DX) патч корд, його довжина в метрах та діаметр патч кордової оболонки (2 чи 3 мм). Також на упаковці вказуються параметри вносимих (Insertion Loss, IL) та зворотніх (Return Loss, RL) згасань на кожному конекторі. Приклад маркування патчкорда наведено на рисунку 3.63.



Рис. 3.63. Приклад маркування патч корда.

По якщо ви бачите патч корд, наприклад бірюзового кольору на якому написано Multimode (або ММ, або 50/125, або OM3) і на ньому знаходяться конектори SC зеленого кольору (що свідчить про полірування APC), то це якийсь саморобний патч корд зроблений невідомо де і очікувати від нього «чуда» буде даремно.

Пігтейли зазвичай ідуть білого кольору. Характеристики пігтейла треба дивитись на маркуванні його упаковки.

Просто треба запам'ятати: жовтий патч корд – конектори синього або зеленого кольору, патч корди всіх інших кольорів – конектори сірі (бежеві). Це за умови, що патч корди у нас для внутрішнього застосування. Якщо колір патч кордової оболонки чорного кольору – то це патч корди для зовнішнього застосування і який тип волокна та інші характеристики треба дивитись на упаковці патч корда та на самій патч кордовій оболонці.

3.6. Оптичні атенюатори

Атенюатори (3.64.) використовуються для зменшення потужності вхідного оптичного сигналу. Занадто високий рівень сигналу на прийомі може призвести до перенавантаження приймального оптоелектронного модуля. За принципом дії атенюатори бувають змінні та фіксовані.

Змінні атенюатори допускають регулювання величини згасання в межах 0-20 дБ для багатомодових та одномодових волокон з точністю встановлення величини згасання 0,5 дБ. Регулювання досягається шляхом зміни величини повітряного зазору.

Фіксовані атенюатори мають встановлене виробником значення згасання, величина якого може становити 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15 або 20 дБ. Згасання може вноситься за допомогою повітряного зазору фіксованої величини, або за допомогою спеціального фільтра вбудованого в атенюатор. В останньому випадку значно зменшується зворотне відбиття, оскільки фільтр має близький до волокна показник заломлення, що сильно зменшує зворотне френелівське розсіювання.



Рис. 3.64. Оптичні атенюатори.

3.7. Спліттери

Спліттер (від англ. Split – розділяти) – сленгова назва пасивного компонента волоконно-оптичних мереж (рис. 3.65.), призначеного для поділу світлового сигналу від одного порту до кількох або поєднання сигналу від декількох портів до одного на мережі між стаціонарним та абонентськими терміналами. Також дуже часто оптичні спліттери називають оптичними дільниками.



Рис. 3.65. Спліттер чеської компанії Optokon.

Компактне виконання спліттерів та їх широкий модельний ряд дозволяють забезпечити вирішення багатьох проблем при побудові волоконно-оптичних мереж. Крім цього, компактний конструктив дозволяє абсолютно спокійно і безболісно інтегрувати оптичні спліттери в оптичні кроси або муфти, а також пристрої абонентського доступу. Така широка гама застосування оптичних спліттерів дозволяє досить гнучко підходити до архітектури (топології) волоконно-оптичної мережі.

Загальні вимоги до оптичних спліттерів можна виразити так:

- низькі втрати, що вносяться;
- високі втрати у зворотному напрямку;
- незалежний поділ режимів на окремі напрямки;
- просте регулювання;
- простота виробництва.

Основне своє застосування спліттери знаходять:

- у мережах НФС (гібридних волоконно-коаксіальних) для розподілу сигналу від одного оптичного передавача до кількох оптичних вузлів;
- у перспективній та передовій технології PON (пасивні оптичні мережі, що застосовується багатьма провайдерами та операторами кабельного телебачення).

Тим самим застосування оптичних спліттерів дозволяє оптичним мережам бути гнучкими та масштабованими.

Практично, як і будь-які телекомунікаційні пристрої, оптичні спліттери можна класифікувати та умовно розділити по:

- числу вхідних/вихідних портів;

- робочій довжини хвилі;
- класу якості;
- типу конектора;
- технології виробництва.

Відповідно до цього давайте розглянемо вищеперелічені класи оптичних спліттерів докладніше.

За кількістю вхідних/вихідних портів, коефіцієнтом розподілу. Оптичні спліттери, що мають один вхід та кілька виходів (1xN), найчастіше застосовуються операторами та провайдерами у вітчизняних мережах. Однак, коли стоїть завдання резервування, подібних пристроїв по входу, наприклад, коли магістральні волоконно-оптичні лінії зв'язку є кільцем, при його обриві потрібно «запитати» оптичний приймач з іншого напрямку без візиту служби експлуатації на кожен з вузлів, застосовуються два вхідні спліттери (2xN). Розподіл оптичної потужності по відводам (виходам) оптичного спліттера може бути як рівномірним (наприклад, дільник на 4 має по 25% потужності на кожному відводі), так і нерівномірним (приклад, де на виходи першого оптичного спліттера потрапляє відповідно 10%, 50%, 40% від вхідної потужності. Кількість вихідних портів може змінюватись від 2 до 128. Для нерівномірних спліттерів крок коефіцієнта поділу (різниці у вихідній потужності) зазвичай становить 5%.

За робочою довжиною хвилі спліттери поділяються за такими параметрами робочої довжини хвилі:

- одновіконні (1310 нм або 1550 нм);
- двовіконні (1310 нм та 1550 нм);
- тривіконні (1310,1490,1550 нм);
- широкосмугові (1270 нм - 1630 нм).

За класом якості. Існує два класи - А і В. Оптичні спліттери класу А мають кращі характеристики у широких вікнах (± 40 нм), тоді як клас В гарантує кращі характеристики у вузьких вікнах ($\pm 10-20$ нм). Слід також зазначити, що оптичні спліттери класу А мають менші оптичні втрати, що вносяться (Insertion Loss, IL), параметр максимальної додаткової втрати потужності (Maximum Excess Loss). Однак зазвичай спліттери класу якості А виготовляються лише за спецзамовленням.

За типом конектора. Кожен оптичний спліттер залежно від потреб замовника може бути оконцований будь-яким роз'ємом, залежно від його призначення або бажання замовника. Крім цього може змінюватись діаметр захисної оболонки на вихідних волокнах (250 мкм, 500 мкм, 2 мм і т.д.), а також вигляд і матеріал, з якого виготовлений корпус самого оптичного спліттера.

За типом виробництва оптичні спліттери можна розділити на зварні FBT (fused biconic taper) та планарні PLC (planar-lightwave-circuit).

Оптичні спліттери також можуть бути виконані у вигляді невеликої трубки/Такий варіант виконання моуть називати Tube-type (рис. 3.66.).



Рис. 3.66. Спліттери чеської компанії Optokon.

Технологія виготовлення зварних спліттерів дуже схожа на звичайне і всім звичне зварювання оптичних волокон. Але при цьому є кілька нюансів та принципових відмінностей. При виготовленні зварних спліттерів волокна підготовлюються так само, як і до звичайного зварювання під час монтажу оптичного кабелю. Після чого саме виробництво оптичного спліттера відбувається в кілька етапів:

- два волокна без захисного покриття розташовують так, щоб вони були паралельно один одному;
- кінці оптичних волокон підключають до джерел та приймачів оптичного сигналу. На місце виготовлення спліттера насувається воднева піч та відбувається сплавлення оптичних волокон. Виготовлення спліттера відбувається за постійного контролю коефіцієнта його поділу, необхідне значення якого досягається шляхом розтягування оптичних волокон у місці розташування водневого пальника.

Після закінчення процесу виготовлення спліттера він встановлюється в кварцову кювету і заливається спеціальним гелем. Залежно від того, якого типу спліттер необхідно отримати - «Х» (2x2 - два входи, два виходи) або «Y» (1x2 - один вхід, два виходи), одне з вхідних оптичних волокон (вхід 2) може бути «сколото» » або «заіммерсовано» (іншими, більш простими та зрозумілими словами - заглушено). Це необхідно для мінімізації втрат, якщо потрібно отримати оптичний спліттер типу «Y» (рис. 3.67.). Далі слідує розміщення спліттера в корпусі необхідного виду.

Технологія виготовлення планарних спліттерів.

Спліттери даного виду виробляються за товстоплівковою технологією на оптопровідній підкладці. Оптичні хвилеводи розміщуються на підкладці та мають відмінний від неї коефіцієнт заломлення. Теорія оптичних хвилеводів говорить, що напрямні властивості хвилеводу залежать від коефіцієнта

заломлення підкладки та хвильоводного шару, а також геометричних розмірів безпосередньо самого каналу хвильоводної схеми. Ширина та висота даних каналів вибирається таким чином, щоб забезпечити одномодовий режим у всьому робочому діапазоні від 1260 нм до 1680 нм. Основною перевагою планарної технології є те, що дана технологія дозволяє реалізовувати Y-, X- і складніші конфігурації оптичних спліттерів.

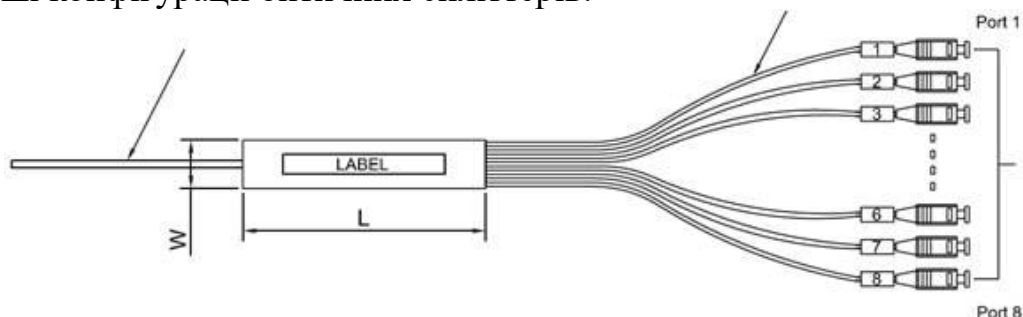


Рис. 3.67. Спліттер чеської компанії Optokon.

В таблиці представлені 3.1. показані типові згасання на сплітерах, в залежності від їх виду.

Табл. 3.1. Типові згасання на сплітерах

Планарні сплітери		Зварні сплітери		
Дільник	Згасання, dB	Дільник	Згасання на довжині хвилі 1310нм, dB	Згасання на довжині хвилі 1550нм, dB
1x2	4.3	50/50	3.17/3.19	3.12/3.17
1x3	6.2	45/55	3.73/2.71	3.73/2.72
1x4	7.4	40/60	4.01/2.34	3.92/2.32
1x6	9.5	35/65	4.56/1.93	4.69/1.96
1x8	10.7	30/70	5.39/1.56	5.53/1.57
1x12	12.5	25/75	6.29/1.42	6.28/1.28
1x16	13.9	20/80	7.11/1.06	7.21/1.06
1x24	16.0	15/85	8.16/0.76	8.17/0.82
1x32	17.2	10/90	10.08/0.49	10.21/0.60
1x64	21.5	5/95	13.70/0.32	12.83/0.35
1x128	25.5			

3.8. Оптичні реле

Оптичні реле та перемикачі – це пристрої, які керують напрямком або потоком оптичного сигналу (зазвичай у волоконно-оптичних системах), без перетворення світла в електричний сигнал (рис. 3.68. та 3.69.). Волокна фіксуються всередині металевого геркона - це мініатюрна герметична трубка, яка містить магнітно керовані елементи. Магнітне поле впливає на геркон - змінюючи положення всередині трубки. Це переміщує або з'єднує оптичні волокна, забезпечуючи проходження чи перенаправлення світлового сигналу.

Волокна всередині геркона точно позиціонуються. Магнітне поле (зовнішнє або від вбудованої котушки) змушує елемент всередині переміщатись. Це механічно вирівнює активні волокна так, щоб світло проходило безперешкодно. У вимкненому стані або при іншому положенні - світло перенаправляється або не проходить зовсім.

Переваги такої конструкції:

- пасивне перемикання – не потребує електричного живлення для керування;
- висока швидкість і точність перемикання оптичного сигналу;
- низький рівень втрат (Insertion Loss) при правильному вирівнюванні волокон;
- стійкість до електромагнітних перешкод – особливо актуально для телекомунікацій.

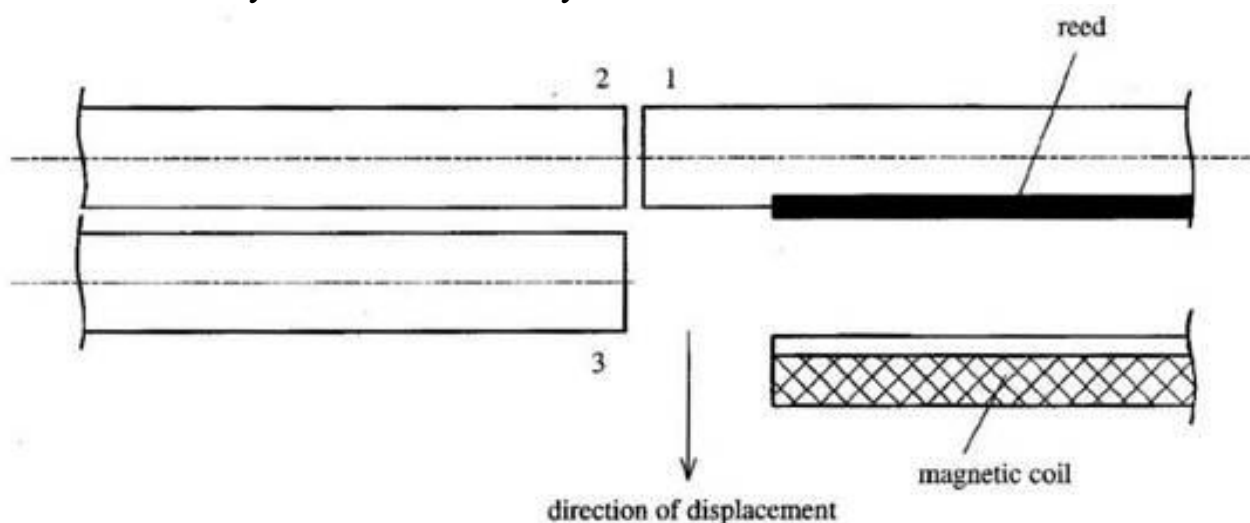


Рис. 3.68. Принцип дії оптичного реле.



Рис. 3.69. Оптичне реле компанії Lightwave Link.

3.9. Мультиплексори та демультиплексори: спектральне ущільнення каналів

Спектральне ущільнення каналів (англ. Wavelength-division multiplexing, WDM, буквально мультиплексування з поділом по довжині хвилі) – технологія, що дозволяє одночасно передавати кілька інформаційних каналів по одному оптичному волокну на різних довжинах хвиль.

Максимально ефективне використання пропускної спроможності оптичної мережі – ключове завдання для операторів зв'язку. Технології спектрального ущільнення WDM, CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing), DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) дозволяють у кілька разів збільшити ємність оптичної мережі, і досягти максимальної продуктивності оптичного волокна. Ці технології (WDM, CWDM та DWDM) є протоколоне залежними, тому використовуючи цю технологію можна мультиплексувати декілька різних протоколів передачі даних, як Ethernet, SDH/SONET, OTN, Fiber Channel та інші.

Спектральне ущільнення каналів (англ. Wavelength-division multiplexing, WDM, буквально мультиплексування з поділом по довжині хвилі) – технологія, що дозволяє одночасно передавати кілька інформаційних каналів по одному оптичному волокну на різних довжинах хвиль.

Максимально ефективне використання пропускної спроможності оптичної мережі – ключове завдання для операторів зв'язку. Технології спектрального ущільнення WDM, CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing), DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) дозволяють у кілька разів збільшити ємність оптичної мережі, і досягти максимальної продуктивності оптичного волокна. Ці технології (WDM, CWDM та DWDM) є протоколоне залежними, тому використовуючи цю технологію можна мультиплексувати декілька різних протоколів передачі даних, як Ethernet, SDH/SONET, OTN, Fiber Channel та інші.

Пасивні мультиплексори та оптичні мультиплексори вставки/видалення (OADM – Optical Add-Drop Multiplexer) є одними з основних елементів таких систем. Ці пристрої дозволяють ефективно використовувати існуючу волоконно-оптичну інфраструктуру, підвищуючи пропускну здатність без необхідності інвестицій у нові кабелі.

Пасивні мультиплексори/демультиплексори (multiplexer/demultiplexer або скорочено mux/demux) – це оптичні пристрої, які поєднують (mux) кілька сигналів з різними довжинами хвиль в один оптичний канал або, навпаки, поділяють (demux) їх. На відміну від активних мультиплексорів, вони не вимагають подачі зовнішнього живлення, що робить їх досить простими та надійними в експлуатації. Основний принцип роботи пасивних мультиплексорів ґрунтується на використанні діелектричних фільтрів (TFF), дифракційних решіток або хвилеводних структур, таких як масив світловодів – AWG.

AWG (Arrayed Waveguide Grating) – використовує планарний світловодний ланцюг з масивом хвилеводів, кожен з яких має трохи різну довжину, для створення фазових зсувів, що залежать від довжини хвилі, і інтерференційних картин, що направляють хвилі різних довжин на різні вихідні порти. Це дозволяє мультиплексувати та демультиплексувати кілька оптичних каналів з різними довжинами хвиль в одному волокні.

TFF (Thin Film Filter – тонкоплівковий фільтр) є оптичним пристроєм, що використовує тонкі діелектричні плівки для фільтрації світла на основі його довжини хвилі. TFF складається з безлічі шарів діелектричного матеріалу з різними показниками заломлення. Ці шари створюють інтерференційні ефекти, пропускаючи чи відбиваючи світло певних довжин хвиль. У мультиплексорі TFF кожен фільтр налаштований певну довжину хвилі, і сигнали послідовно проходять через серію фільтрів, де потрібні довжини хвиль витягуються чи додаються. Працює як каскадна система фільтрів, де кожен фільтр відповідає за канал.

Основна перевага пасивних мультиплексорів у тому, що вони працюють за технологією «plug-and-play», не потребуючи особливого налаштування, як активні системи. Це знижує складність розгортання та мінімізує ризики збоїв, спричинені відключенням електроживлення. При використанні в DWDM-мережах мультиплексори ідеально підходять для точок доступу та агрегації трафіку, забезпечуючи економію місця та ресурсів.

Оптичні мультиплексори вставки/видалення (OADM – Optical Add-Drop Multiplexer) – це пасивні чи напівпасивні пристрої, призначені для вибіркового додавання чи видалення конкретних довжин хвиль із оптичного потоку без впливу інших каналів. У DWDM-мережах OADM функціонують як «вузли» в лінійній або кільцевій топології, що дозволяє динамічно маршрутизувати трафік. Дуже часто в розмовній мові серед спеціалістів OADM-мультиплексори називають «еддропами» від англійського терміну (ADD/DROP)

Принцип роботи OADM заснований на фільтрах з фіксованими або довжинами хвиль, що настроюються. Фіксовані OADM (FOADM – Fixed Optical Add-Drop Multiplexer) вставляють/видаляють певні канали, тоді як реконфігуровані (ROADM – Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) дозволяють змінювати конфігурацію віддалено. Наприклад, оптичний сигнал, що входить, проходить через демультіплексор, де обрана довжина хвилі видаляється (drop) для підключення локального обладнання, а нова додається (add) перед мультиплексуванням назад в лінію.

OADM інтегруються з іншими компонентами DWDM, такими як оптичні підсилювачі (EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier) для компенсації втрат сигналу, що забезпечує передачу даних на великі відстані без необхідності регенерації сигналу. На відміну від простих мультиплексорів, OADM додають гнучкість: вони дозволяють будувати мережі з відгалуженням (деревоподібна структура), де трафік може бути перенаправлений залежно від навантаження чи потреб.

Пасивні мультиплексори дають величезну кількість переваг при використанні, роблячи їх незамінними в сучасних оптичних мережах. По-перше, низька чи повна відсутність енергоспоживання знижує експлуатаційні витрати.

По-друге, висока надійність та довговічність. Через відсутність рухомих частин або електронних компонентів, схильних до зносу, пасивні мультиплексори мають середній час напрацювання на відмову (MTBF – Mean Time Between Failures) понад 100 000 годин. Це мінімізує простои та витрати на обслуговування. Крім того, вони стійкі до електромагнітних перешкод та температурних коливань, що робить їх ідеальними для розгортання як у дата-центрах, так і на магістральних лініях.

По-третє, економічність. Пасивні DWDM-мультиплексори дозволяють максимально використовувати існуючі оптичні волокна, збільшуючи пропускну здатність у 40-80 разів без прокладання нових кабелів. Це особливо вигідно для операторів зв'язку та корпоративних мереж, де бюджет зазвичай обмежений.

Крім того, використання DWDM-мультиплексорів досить компактні, легко інтегруються в стандартні телекомунікаційні шафи і стійки і масштабуються при необхідності або зростанні трафіку. В результаті дозволяє швидко адаптуватися до зростаючих вимог, таких як 5G, хмарні сервіси або IoT.

Також варто зазначити, що на відміну від активних систем, де потрібен постійний моніторинг та налаштування, пасивні мультиплексори працюють автономно, знижуючи навантаження на IT-персонал.

OADM посилюють гнучкість DWDM-мереж, пропонуючи унікальні переваги. Головне – це можливість вставляти/видаляти канали на оптичному рівні без переривання трафіку. Це скорочує час на реконфігурацію мережі з годинника до хвилин, що критично для високонавантажених систем.

Економія ресурсів – замість повного демультіплексування всього потоку OADM обробляють лише необхідні канали, знижуючи втрати сигналу і

необхідність у додаткових підсилювачах. У системах без OADM повний демультиплексор може вводити додаткові втрати (наприклад, 3-6 дБ мультиплексор), тоді як OADM мінімізує ці втрати до 1-2 дБ на канал, залежно від технології (наприклад, AWG).

OADM також сприяють оптимізації спектру – вони дозволяють ефективно розподіляти довжини хвиль (додавати та витягувати канали), уникаючи фрагментації спектру. У сучасних системах, особливо з використанням гнучких сіток (flex-grid), де інтервали між каналами динамічно налаштовуються. Наприклад, у системах з C-діапазоном (1530-1565 нм) та інтервалом 50 ГГц можна задіяти майже весь спектр, залишаючи мінімальні зазори для захисту від перехресних перешкод.

Ще одна перевага – сумісність із існуючими інфраструктурами. OADM можна інтегрувати в мережу без її значних модифікацій, а це, у свою чергу, спрощує міграцію на DWDM. Для компаній це означає відносно швидку окупність інвестицій.

У плані надійності OADM мінімізують точки відмови - оскільки пасивні пристрої не залежать від електроживлення та не мають рухомих чи електронних компонентів. OADM також підтримують захист трафіку через кільцеві топології, де у разі обриву сигнал автоматично перенаправляється на резервний канал.

Пасивні мультиплексори та OADM широко застосовуються при будівництві DWDM-мереж. У магістральних мережах операторів DWDM-мультиплексори використовуються для агрегації трафіку між містами, де потрібна передача відстані 100-1000 км. У цьому випадку вони використовуються разом з EDFA-підсилювачами для компенсації втрат, забезпечуючи стабільність сигналу.

У міських мережах OADM ідеальні для розбудови розгалуженої інфраструктури. Наприклад, при побудові кільцевої топології територіально-розподіленої інфраструктури компанії вони дають змогу додавати трафік від філій компаній або дата-центрів без зупинки основної лінії.

Для дата-центрів OADM забезпечують гнучкість та масштабованість мереж із підтримкою високих швидкостей передачі даних, включаючи 400G.

У випадках з 5G-бекхоллом пасивні мультиплексори спрощують розгортання, мінімізуючи енерговитрати у базових станціях. Бекхол у мережах 5G – це транспортна мережа, що з'єднує базові станції (gNodeB) із ядром мережі. DWDM-системи з пасивними мультиплексорами дозволяють передавати безліч каналів по одному волокну, що є ідеальним для високошвидкісних 5G.

На мережах інтернет-провайдерів (ISP – Internet Service Provider) OADM допомагають гнучко розширювати мережу.

Інтеграція пасивних мультиплексорів та OADM у DWDM-мережі – це стратегічний вибір для компаній. По-перше, вони вирішують проблему

обмеженої пропускної спроможності, дозволяючи масштабувати мережу без радикальних змін.

По-друге, економічні вигоди, що означає оптимізацію бюджету.

По-третє, надійність та гнучкість. Також OADM у DWDM-мультиплексори відповідають стандартам (наприклад, ITU-T G.694.1), гарантуючи сумісність.

Використовувати їх варто у випадках, коли мережа вимагає високої густини каналів, організації передачі на далекі відстані або динамічної реконфігурації.

Пасивні мультиплексори та OADM – це ключові елементи для побудови ефективних DWDM-мереж. Їхні переваги в надійності, економічності та гнучкості роблять їх незамінними, особливо при оптимізації інфраструктури. Використовуючи ці пристрої, ви не тільки підвищуєте продуктивність, а й готуєте мережу до потенційної модернізації.

3.9.1. Технологія WDM

WDM (Wavelength Division Multiplexing) – технологія спектрального ущільнення, яка дозволяє одночасно передавати кілька довжин хвиль в одному оптичному волокні. Це схоже на те, як радіостанції працюють на різних частотах. Всі об'єднані сигнали передаються через одне оптичне волокно, не заважаючи один одному, бо різні довжини хвиль не взаємодіють одне з одним у волокні – кожен канал передає свою інформацію паралельно. Для об'єднання чи розділення довжин хвиль використовуються спеціальні фільтри або дифракційні решітки, які пропускають лише певні діапазони довжин хвиль. Відповідно, мультиплексор об'єднує кілька довжин хвиль і передає їх по одному волокну, а демультимплексор приймає ці довжини хвиль з одного волокна та розподіляє по відповідним приймачам (рис. 3.70.).

Найпростіші реалізації WDM підтримують передачу 2 довжин хвиль, типові пари для трансиверів 100 МБіт/с та 1 ГБіт/с: 1310/1550 нм, 1490/1550 нм, 1310/1490 нм.

Для WDM-трансиверів зі швидкістю 10 ГБіт/с використовують, зокрема, пару 1270/1330 нм, характерну для CWDM-інтерфейсів.

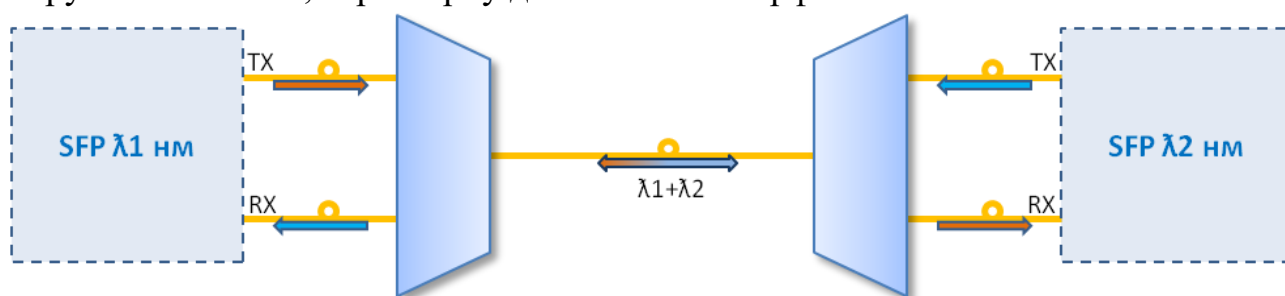


Рис. 3.70. Принцип WDM

На сьогоднішній день технологія WDM здобула найбільшу популярність. Практично всі виробники оптичних трансиверів інтегрують її у свої трансивери (рис. 3.71.).

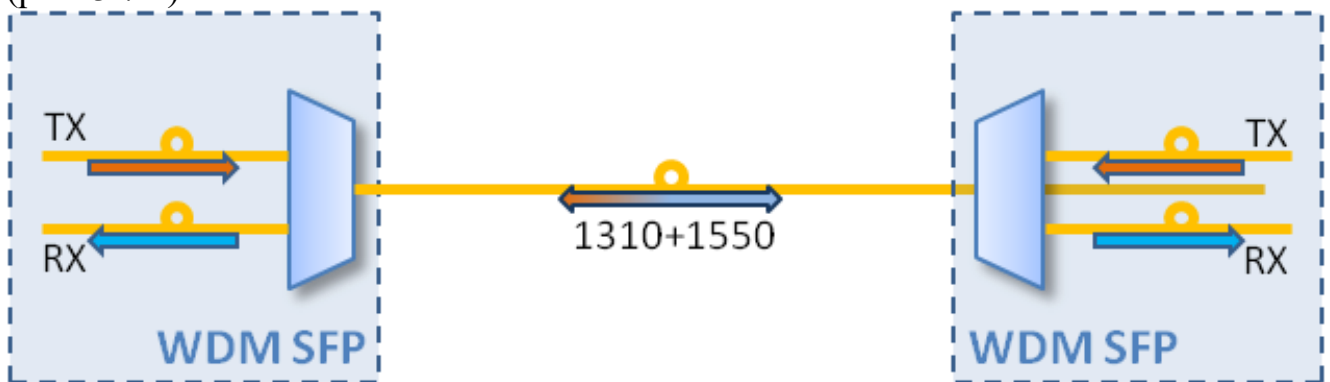


Рис. 3.71. Мультиплексування довжин хвиль 1310 та 1550 нм

Технологія активно використовується в корпоративних мережах, міських інфраструктурах та магістральних лініях зв'язку, де важливо забезпечити високу пропускну здатність та низьку затримку.

У традиційних WDM-системах часто використовується одне волокно для передачі кількох каналів, але також існують двоволоконні WDM-рішення, де одне волокно призначене для передачі, а друге – для прийому. Така схема дозволяє створити повнодуплексне з'єднання без складних оптичних компонентів (рис. 3.72.).

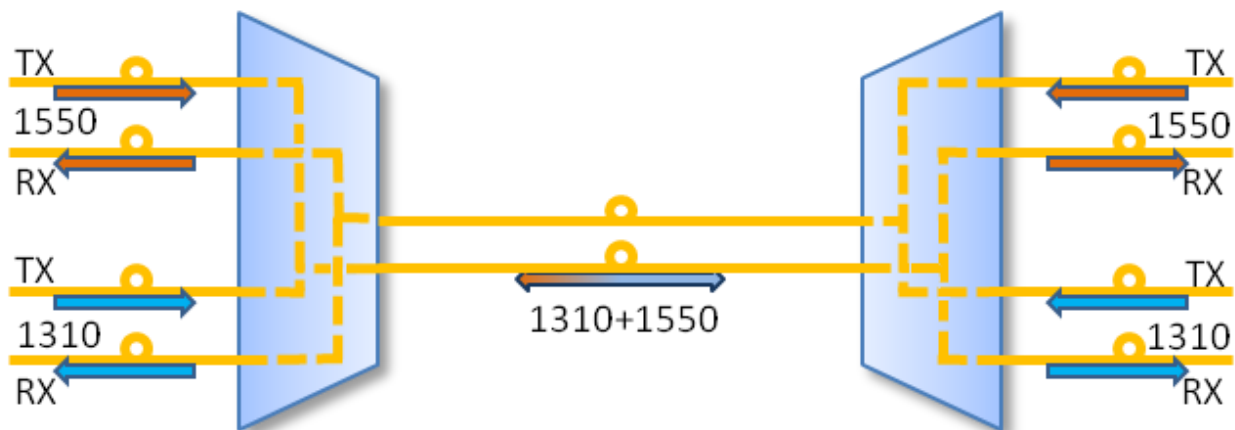


Рис. 3.72. Повнодуплексний режим з використанням двоволоконного WDM-рішення.

3.9.2. Технологія CWDM

Технологія спектрального ущільнення CWDM, дозволяє значно збільшити кількість каналів, які будуть передаватись по оптичному волокну і є подальшим розвитком технології WDM (скоріше її різновидом).

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing – грубе хвильове мультиплексування) – це технологія, яка дозволяє передавати кілька потоків

даних через один оптичний кабель, використовуючи різні довжини хвиль світла.

На відміну від DWDM, CWDM має ширші проміжки між довжинами хвиль (зазвичай 20 нм), що робить його менш складним і більш дешевим у реалізації. Однак CWDM не підтримує оптичне підсилення сигналу, тому його дальність дещо обмежена (приблизно 100 км). На рис. 3.73. представлений CWDM мультиплексор (без верхньої кришки) рекового виконання для розміщення в 19 дюймовій шафі а на рис. 3.74. CWDM мультиплексор форм-фактора Voh-типу.

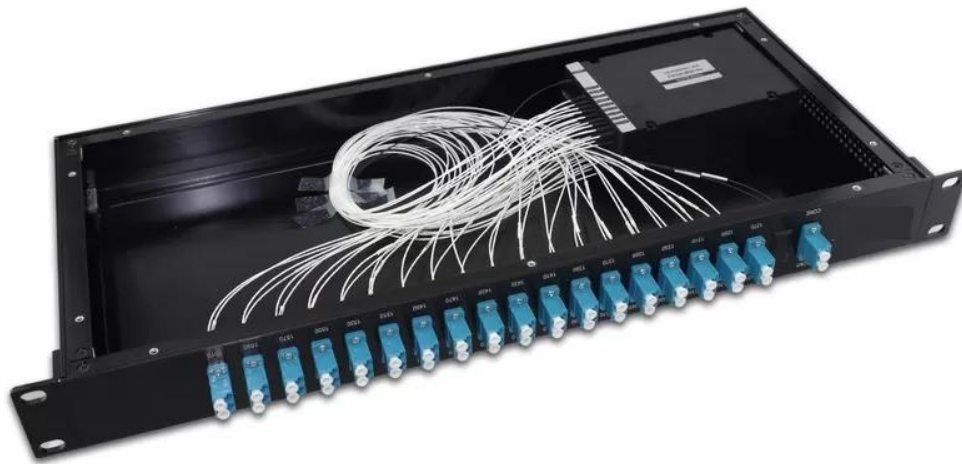


Рис. 3.73. CWDM мультиплексор (без верхньої кришки) рекового виконання для розміщення в 19 дюймовій шафі.

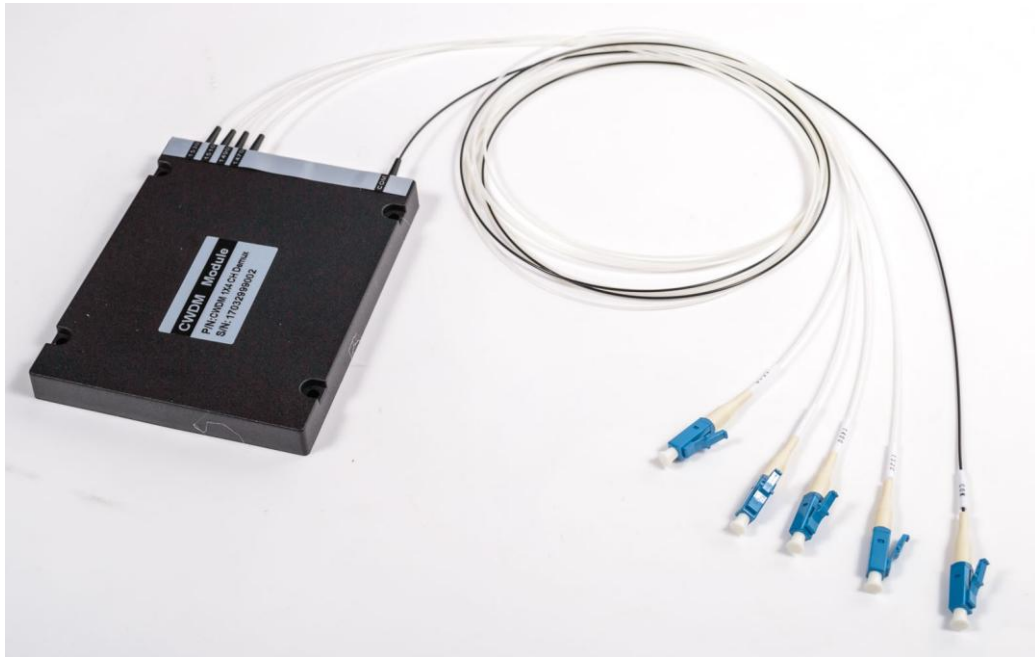


Рис. 3.74. CWDM мультиплексор форм-фактора Voх-type.

Рішення спектрального ущільнення CWDM дозволяє ущільнити до 18 оптичних довжин хвиль у спектрі від 1270 до 1610 нм з кроком 20 нм (таб. 3.2.). Кількість довжин хвиль визначається типом оптоволоконного кабелю, що використовується для передачі. Завжди треба звертати увагу на тип кабелю, який використовується, бо є кабелі, які використовують волокна з «піком води».

«Пік води» (англ. water peak) - це спектральна ділянка з підвищеним згасанням сигналу, спричинена наявністю гідроксильних груп (OH^-) у оптичному волокні. Фактично – це діапазон довжин хвиль (приблизно 1383 нм), де оптичне згасання різко зростає. Причина цього криється в залишковій волозі або гідроксильних домішках в склі, які поглинають світло на цій частоті. У старих типах волокон ця зона була непридатною для передачі сигналу.

Сучасні волокна типу G.652.D, G.657.A1/A2 мають знижену концентрацію OH^- , тому «пік води» практично усунутий. Це дозволяє використовувати ширший спектр довжин хвиль, включаючи діапазон 1383 нм, що особливо важливо для CWDM-систем.

Табл. 3.2 Канали CWDM з їхніми центральними довжинами хвиль

№ каналу	Довжина хвилі (нм)
1	1270
2	1290

3	1310
4	1330
5	1350
6	1370
7	1390
8	1410
9	1430
10	1450
11	1470
12	1490
13	1510
14	1530
15	1550
16	1570
17	1590
18	1610

CWDM використовує крок 20 нм між каналами, що дозволяє спростити обладнання та знизити його вартість.

Аналогічно WDM технології існують як одноволоконні (рис. 3.75.), так і двоволоконні CWDM рішення. Враховуючи те, що для передачі даних необхідно організувати канал передачі і канал прийому, для кожного потоку використовується по дві довжини хвилі. Відповідно, наприклад, у рішенні на 8 довжин хвиль в одноволоконному варіанті можна передати 4 потоки (Ethernet, SDH/SONET, Fiber Channel тощо).

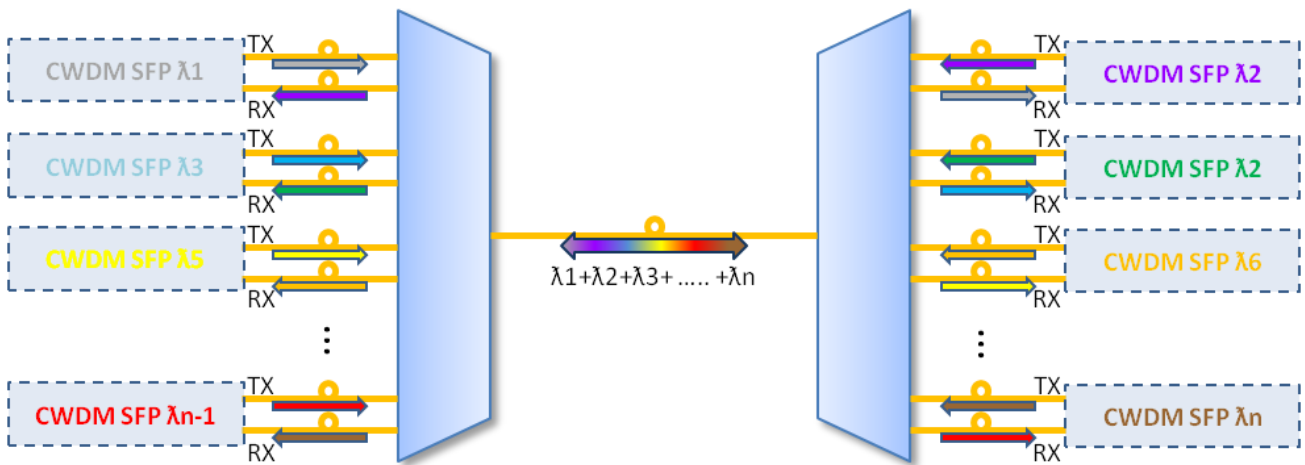


Рис. 3.75. Одноволоконне CWDM рішення

Враховуючи можливість ущільнення за допомогою CWDM рішення великої кількості довжин хвиль, іноді існує потреба вставки/виділення певної довжини хвилі або групи довжин хвиль у проміжній точці мережі (рис. 3.76.). Класично, це можна реалізувати, встановивши в даній точці CWDM мультиплексори, демультимплексувати всі довжини хвиль, виділити одну або групу з них, а ті, що залишилися знову ж таки мультиплексувати за допомогою іншого CWDM мультиплексора. Таке рішення спричинить надто великі додаткові витрати. Для цього завдання існують так звані OADM (ADD/DROP) мультиплексори (рис. 3.77.) – пристрої вставки\видалення. Даний пристрій дозволяє із загального спектру виділити певну довжину хвилі, при цьому пропустити прозоро через себе всі інші довжини хвиль.

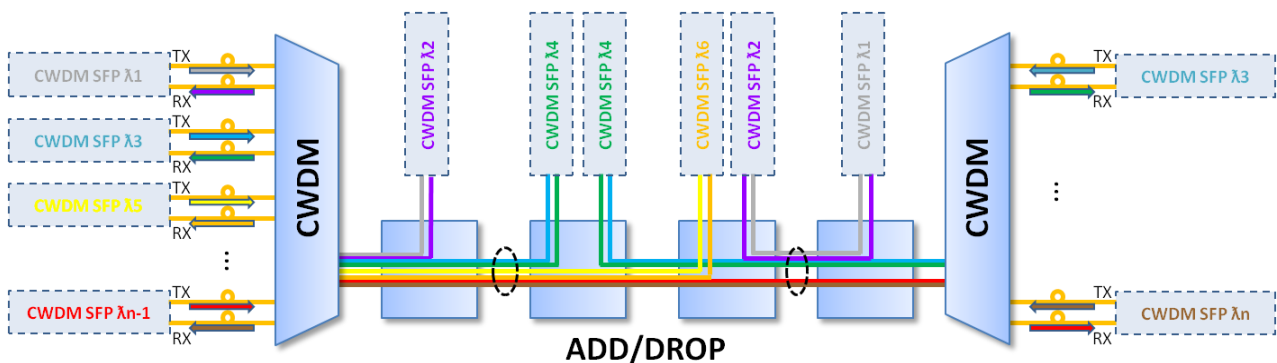


Рис. 3.76. Схемне рішення з використанням OADM (ADD/DROP) мультиплексорів.



Рис. 3.77. OADM (ADD/DROP) мультиплексори.

На рис. 3.78. показані приклади можливих конфігурацій пасивних оптичних OADM (ADD/DROP) мультиплексорів.

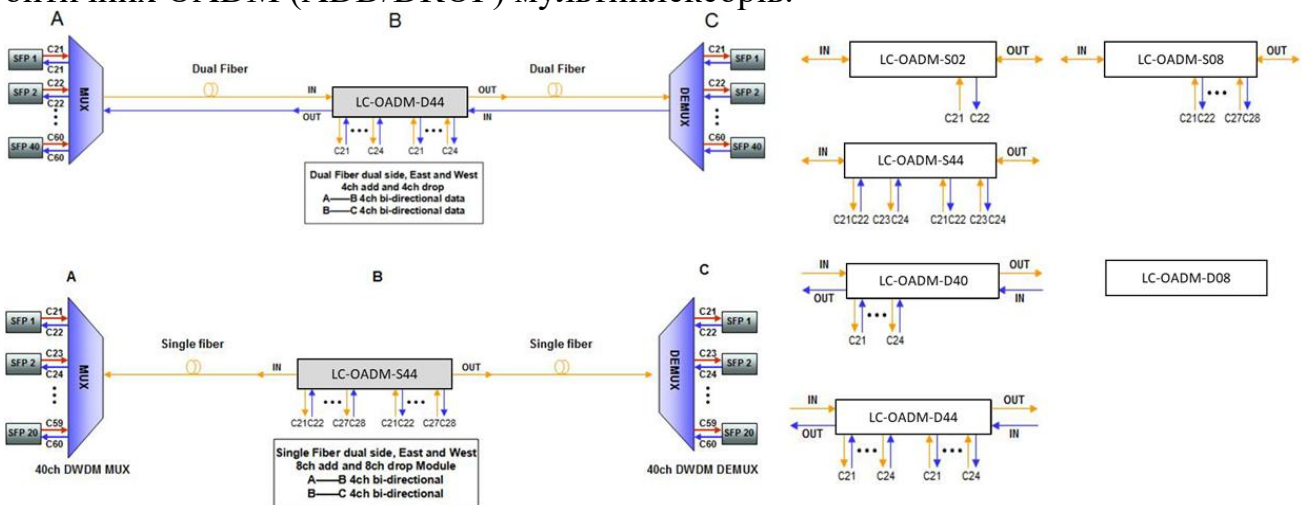


Рис. 3.78. Приклади можливих конфігурацій пасивних оптичних ADD/DROP мультиплексорів.

3.9.3. Технологія DWDM

Ще одним варіантом спектрального ущільнення є технологія DWDM.

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне спектральне мультиплексування) – це технологія ущільнення каналів передачі даних, за якої кожен інформаційний потік передається на окремій довжині хвилі у межах оптичного спектра. Мультиплексор DWDM об'єднує кілька таких каналів у

єдиний високошвидкісний оптичний сигнал, який передається по одному волокну. На приймальному кінці демультиплексор розділяє сигнал назад на окремі довжини хвиль, дозволяючи приймачам обробляти кожен потік незалежно.

Кількість каналів у DWDM залежить від частотного розподілу та діапазону використання.

- 100GHz DWDM зазвичай підтримує 61 канал у C-діапазоні (C01-C61) та 35 каналів у L-діапазоні (L66-L00).

- 50GHz DWDM може підтримувати до 80 каналів.

В табл. 3.3. представлена сітка частот та довжин хвиль з позначенням каналу в DWDM.

Табл. 3.3. 100-гігагерцова та 50-гігагерцова сітка DWDM-каналів.

ITU Grid Channels (100 GHz Spacing)					
Channel	Frequency (GHz)	Wavelength (nm)	Channel	Frequency (GHz)	Wavelength (nm)
1	190,100	1577.03	38	193,800	1546.92
2	190,200	1576.20	39	193,900	1546.12
3	190,300	1575.37	40	194,000	1545.32
4	190,400	1574.54	41	194,100	1544.53
5	190,500	1573.71	42	194,200	1543.73
6	190,600	1572.89	43	194,300	1542.94
7	190,700	1572.06	44	194,400	1542.14
8	190,800	1571.24	45	194,500	1541.35
9	190,900	1570.42	46	194,600	1540.56
10	191,000	1569.59	47	194,700	1539.77
11	191,100	1568.77	48	194,800	1538.98
12	191,200	1567.95	49	194,900	1538.19
13	191,300	1567.13	50	195,000	1537.40
14	191,400	1566.31	51	195,100	1536.61
15	191,500	1565.50	52	195,200	1535.82
16	191,600	1564.68	53	195,300	1535.04
17	191,700	1563.86	54	195,400	1534.25
18	191,800	1563.05	55	195,500	1533.47
19	191,900	1562.23	56	195,600	1532.68
20	192,000	1561.42	57	195,700	1531.90
21	192,100	1560.61	58	195,800	1531.12
22	192,200	1559.79	59	195,900	1530.33
23	192,300	1558.98	60	196,000	1529.55
24	192,400	1558.17	61	196,100	1528.77
25	192,500	1557.36	62	196,200	1527.99
26	192,600	1556.55	63	196,300	1527.22
27	192,700	1555.75	64	196,400	1526.44
28	192,800	1554.94	65	196,500	1525.66
29	192,900	1554.13	66	196,600	1524.89
30	193,000	1553.33	67	196,700	1524.11
31	193,100	1552.52	68	196,800	1523.34
32	193,200	1551.72	69	196,900	1522.56
33	193,300	1550.92	70	197,000	1521.79
34	193,400	1550.12	71	197,100	1521.02
35	193,500	1549.32	72	197,200	1520.25
36	193,600	1548.51	73	197,300	1519.48
37	193,700	1547.72			

ITU Grid Channels (50 GHz Spacing)							
Channel	ITU channel	Frequency (GHz)	Wavelength (nm)	Channel	ITU channel	Frequency (GHz)	Wavelength (nm)
1	64.5	196.45	1526.050	49	40.5	194.05	1544.924
2	64.0	196.40	1526.438	50	40.0	194.00	1545.322
3	63.5	196.35	1526.827	51	39.5	193.95	1545.720
4	63.0	196.30	1527.216	52	39.0	193.90	1546.119
5	62.5	196.25	1527.605	53	38.5	193.85	1546.518
6	62.0	196.20	1527.994	54	38.0	193.80	1546.917
7	61.5	196.15	1528.384	55	37.5	193.75	1547.316
8	61.0	196.10	1528.773	56	37.0	193.70	1547.715
9	60.5	196.05	1529.163	57	36.5	193.65	1548.115
10	60.0	196.00	1529.553	58	36.0	193.60	1548.515
11	59.5	195.95	1529.944	59	35.5	193.55	1548.915
12	59.0	195.90	1530.334	60	35.0	193.50	1549.315
13	58.5	195.85	1530.725	61	34.5	193.45	1549.715
14	58.0	195.80	1531.116	62	34.0	193.40	1550.116
15	57.5	195.75	1531.507	63	33.5	193.35	1550.517
16	57.0	195.70	1531.898	64	33.0	193.30	1550.918
17	56.5	195.65	1532.290	65	32.5	193.25	1551.319
18	56.0	195.60	1532.681	66	32.0	193.20	1551.721
19	55.5	195.55	1533.073	67	31.5	193.15	1552.122
20	55.0	195.50	1533.465	68	31.0	193.10	1552.524
21	54.5	195.45	1533.858	69	30.5	193.05	1552.926
22	54.0	195.40	1534.250	70	30.0	193.00	1553.329
23	53.5	195.35	1534.643	71	29.5	192.95	1553.731
24	53.0	195.30	1535.036	72	29.0	192.90	1554.134
25	52.5	195.25	1535.429	73	28.5	192.85	1554.537
26	52.0	195.20	1535.822	74	28.0	192.80	1554.940
27	51.5	195.15	1536.216	75	27.5	192.75	1555.343
28	51.0	195.10	1536.609	76	27.0	192.70	1555.747
29	50.5	195.05	1537.003	77	26.5	192.65	1556.151
30	50.0	195.00	1537.397	78	26.0	192.60	1556.555
31	49.5	194.95	1537.792	79	25.5	192.55	1556.959
32	49.0	194.90	1538.186	80	25.0	192.50	1557.363
33	48.5	194.85	1538.581	81	24.5	192.45	1557.768
34	48.0	194.80	1538.976	82	24.0	192.40	1558.173
35	47.5	194.75	1539.371	83	23.5	192.35	1558.578
36	47.0	194.70	1539.766	84	23.0	192.30	1558.983
37	46.5	194.65	1540.162	85	22.5	192.25	1559.389
38	46.0	194.60	1540.557	86	22.0	192.20	1559.794
39	45.5	194.55	1540.953	87	21.5	192.15	1560.200
40	45.0	194.50	1541.349	88	21.0	192.10	1560.606
41	44.5	194.45	1541.746	89	20.5	192.05	1561.013
42	44.0	194.40	1542.142	90	20.0	192.00	1561.419
43	43.5	194.35	1542.539	91	19.5	191.95	1561.826
44	43.0	194.30	1542.936	92	19.0	191.90	1562.233
45	42.5	194.25	1543.333	93	18.5	191.85	1562.640
46	42.0	194.20	1543.730	94	18.0	191.80	1563.047
47	41.5	194.15	1544.128	95	17.5	191.75	1563.455
48	41.0	194.10	1544.526	96	17.0	191.70	1563.863

У DWDM-системах пасивні мультиплексори дозволяють передавати до 80 і більше каналів по одному волокну, з інтервалом між довжинами хвиль 0,8 нм (100 ГГц) або 0,4 нм (50 ГГц). Найбільшого поширення на сьогоднішній день набуло обладнання з кроком між каналами в 100 ГГц і використовує діапазон C (1530-1565 нм), рідше використовується діапазон L (1565-1625 нм). Використання DWDM-систем особливо актуальне для мереж з високою щільністю трафіку, де кожен канал може передавати дані на швидкостях від 10 до 400 Гбіт/с і вище. Наприклад, у типовій конфігурації мультиплексор на вході поєднує сигнали від різних джерел, а демультиплексор на виході їх поділяє.

DWDM-мультиплексори сумісні з протоколами IP, ATM, SONET/SDH та Ethernet, забезпечуючи універсальність їх застосування.

У передових системах з 25GHz або 12.5GHz розподілом між каналами можливо досягти ще більшої кількості каналів, хоча такі технології складніші у реалізації.

Область застосування DWDM – це магістральні мережі. Цей вид WDM систем пред'являє більш високі вимоги до компонентів, ніж CWDM (ширина спектра джерела випромінювання, стабілізація температур джерела і т. д.). Поштовх до бурхливого розвитку DWDM мереж дала поява недорогих та ефективних волоконних ербієвих підсилювачів (EDFA), що працюють у проміжку довжин хвиль від 1525 до 1565 нм (третє вікно прозорості кварцового волокна).

На рис. 3.79. показаний DWDM мультиплексор рекового виконання для розміщення в 19 дюймовій шафі, а на рис. 3.80 DWDM мультиплексор форм-фактора Vох-type.



Рис. 3.79. DWDM мультиплексор рекового виконання для розміщення в 19 дюймовій шафі.

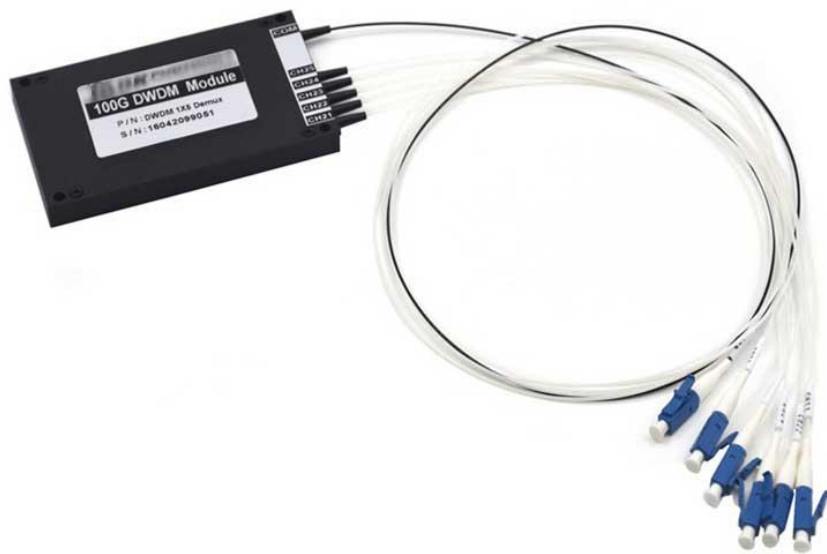


Рис. 3.80. DWDM мультиплексор форм-фактора Voh-типе.

Також існують DWDM мультиплексори модульного типу для встановлення в шасі активного обладнання (рис. 3.81.).



Рис. 3.81. DWDM мультиплексор модульного типу для встановлення в шасі FRM220 виробництва компанії CTC Union (Тайвань).

Коли з'являється необхідність збільшення кількості каналів одним з варіантів стає використання гібридної системи, що дозволяє об'єднати переваги обох систем: масштабованість DWDM і дешевизну CWDM.

Для реалізації гібридної системи необхідно замінити один із каналів CWDM на певну кількість DWDM. Це здійснюється таким чином: на вхідний роз'єм CWDM мультиплексора підключається вихідний роз'єм DWDM мультиплексора. Приклад реалізації такої системи наведено на Рис. 82.

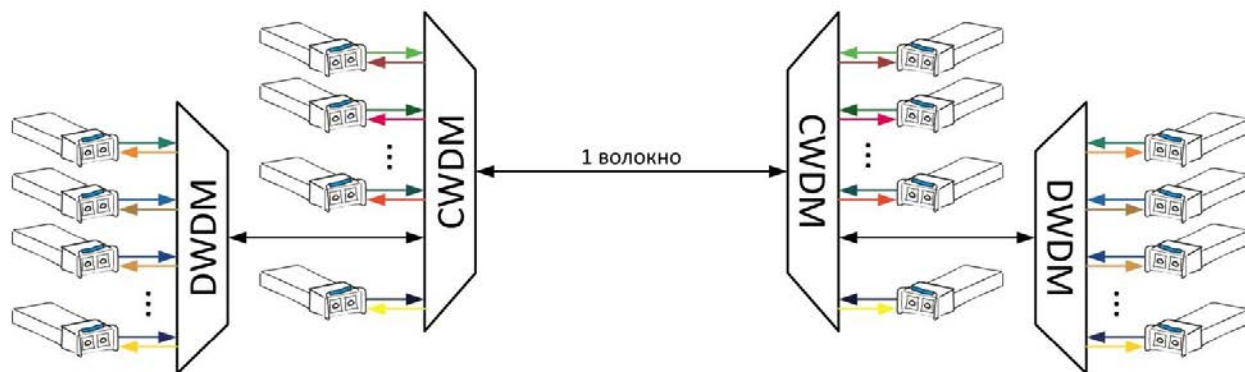


Рис. 3.82. Використання гібридної системи DWDM та CWDM.

Розглянемо докладніше принцип роботи такої системи. Частотний план CWDM мультиплексорів лежить у діапазоні від 1310 до 1610 нм із кроком 20 нм. Частотний план DWDM мультиплексорів становить 73 канали, від 1519,48 до 1577,03 нм з кроком 0,8 нм (канали згідно з ITU-T G.694.1 з частотним інтервалом 100 GHz). Як бачимо частотні плани перетинаються, весь спектр DWDM накладається на три довжини хвилі CWDM спектру: 1530, 1550, 1570 нм. Виходячи з цього, можна припустити, що, прибравши ці 3 довжини хвилі, можна ввести в CWDM мультиплексор весь діапазон DWDM - замість CWDM-каналу у певному діапазоні можна використати DWDM-піддіапазон. Насправді це зробити не вийде. Справа в тому, що ширина лінії пропускання каналного фільтра CWDM мультиплексора - 14 нм. Таким чином, фільтр для каналу 1550 нм захоплює лише довжини хвиль 1543-1557 нм, решта просто «відкидає». І якщо застосувати весь діапазон DWDM, то при демультимплексуванні 35% каналів потраплять у спектр між сусідніми каналними фільтрами CWDM мультиплексора та будуть втрачені.

В результаті ми маємо 3 «вікна» з центральними довжинами хвиль 1530, 1550, 1570 нм. У кожне з цих вікон можна вставити до 16 каналів DWDM:

- 1 вікно – з діапазону 1563,05 - 1577,03 нм (1-18 канали ITU Grid DWDM) у «вікно» каналного фільтра 1563-1577 нм (замість CWDM каналу 1570 нм).

- 2 вікно – з діапазону 1543,73 - 1556,55 нм (26-42 канали ITU Grid DWDM) у «вікно» каналного фільтра 1543-1557 нм (замість CWDM каналу 1550 нм).

- 3 вікно – з діапазону 1523,34 - 1536,61 нм (51-68 канали ITU Grid DWDM) у «вікно» каналного фільтра 1523-1537 нм (замість CWDM каналу 1530 нм).

Таким чином можна отримати 6 CWDM + 24 DWDM дуплексних каналів. У результаті маємо 30 дуплексних каналів, кожен зі швидкості до 10 Гбіт/с. Загальна швидкість може досягати до 300 Гбіт/с (30×10 Гбіт/с).

Схема такого рішення наведена на рис. 3.83.

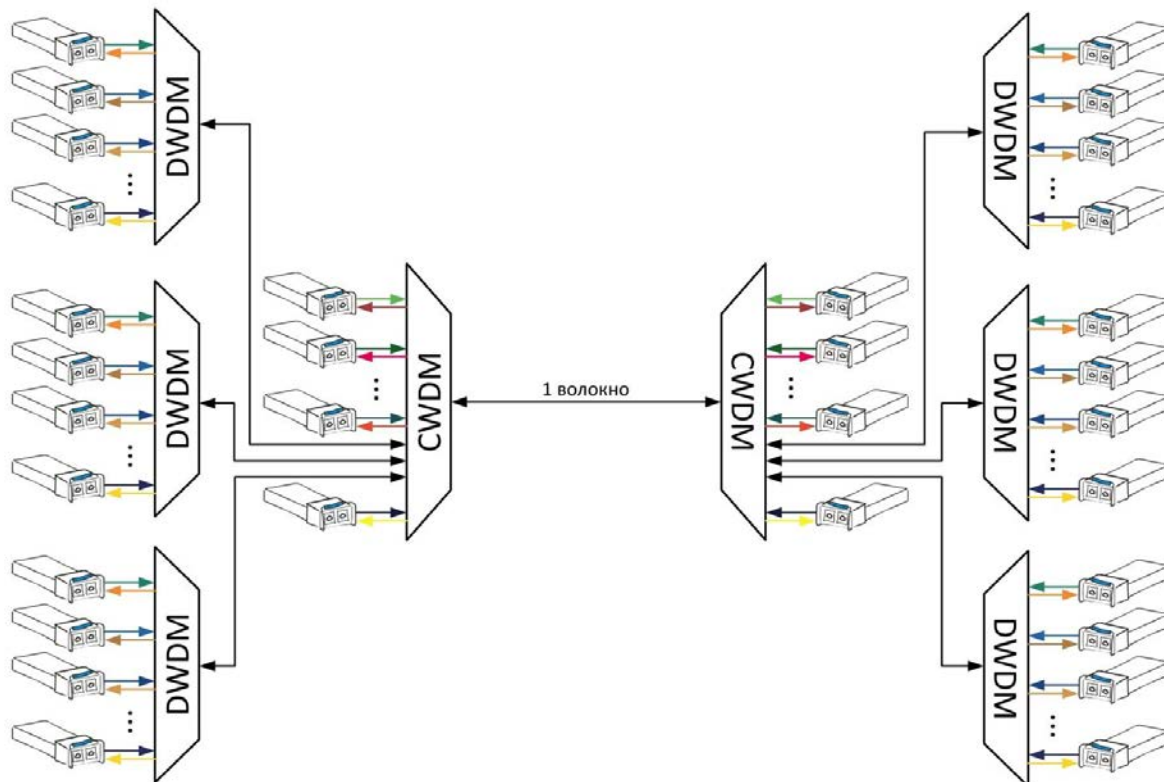


Рис. 3.83. Використання гібридної системи DWDM та CWDM.

Така гібридна система поєднує масштабованість DWDM та економічність CWDM, і є ідеальним рішенням для операторів із потребою поступового нарощування пропускної здатності.

Технології спектрального ущільнення (WDM, CWDM, DWDM) зазвичай застосовуються в одномодових режимах передачі. Для многомодових оптичних трансиверів із пропускною спроможністю 40 Гбіт/с (40G SWDM4) та 100 Гбіт/с (100G SWDM4), що використовують дуплексний кабель використовується технологія Shortwave Wavelength Division Multiplexing (SWDM), яка застосовує чотири довжини хвиль у діапазоні близько 850 нм. Конкретні довжини хвиль для SWDM4 є:

- 40G SWDM4: 850 нм, 880 нм, 910 нм, 940 нм (кожен канал передає 10 Гбіт/с);

- 100G SWDM4: 850 нм, 880 нм, 910 нм, 940 нм (кожен канал передає 25 Гбіт/с).

- Ці довжини хвиль мультиплекуються в один дуплексний многомодовий кабель (OM3, OM4 або OM5) із інтерфейсом LC. Дальність передачі залежить від типу волокна: до 440 м для 40G на OM5 і до 150 м для 100G на OM4/OM5.

3.10. Циркулятори

Основне призначення циркуляторів це економія оптичних волокон у системах прийому-передачі, що працюють по двох волокнах, де використовується окреме волокно для прийому та передачі інформації на одній довжині хвилі. Циркулятор дозволяє організувати керований однонаправлений розподіл світла між портами. Він спрямовує сигнал з порту 1 → 2, потім з порту 2 → 3, тощо (у замкненому циклі) – рис. 3.84.

Завдяки циркулятору можна використовувати одну довжину хвилі для двосторонньої передачі, зменшуючи кількість необхідних волокон. Це дозволяє ущільнити існуючу інфраструктуру без переходу на складні або дорогі системи спектрального мультиплексування (CWDM, DWDM) – рис. 3.85.

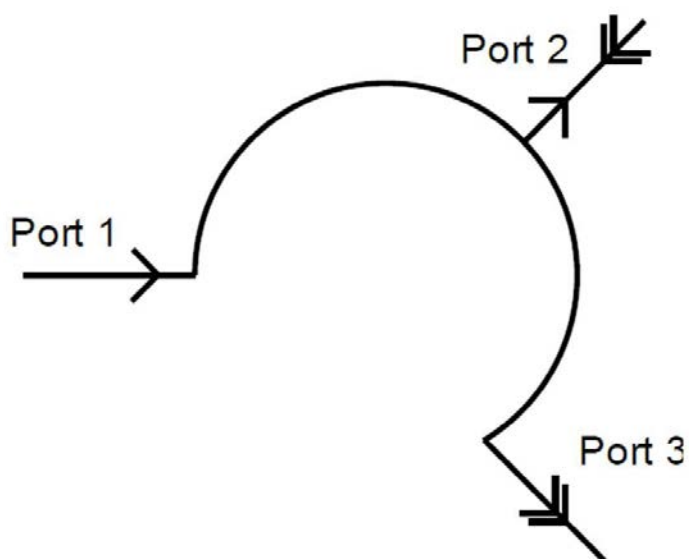


Рис. 3.84. Схема роботи оптичного циркулятора



Рис. 3.85. Оптичний Циркулятор

Використана література для написання розділу [1, 7, 8, 11, 12, 15, 16, 19, 22, 23, 25, 27, 28, 35, 36, 40, 49, 50, 59, 60, 62, 63, 64, 71, 72, 74, 83].

Загальні питання для самоконтролю до розділу

- Яка конструкція волоконно-оптичного кабелю?
- Як розрізняються кабелі зовнішнього та внутрішнього прокладання?
- Що таке LSZH-оболонка, і для чого її використовують?
- Які типи оптичних роз'ємів найчастіше застосовуються?
- Як впливає тип полірування конектора на оптичні втрати?
- Які функції виконує оптичний крос (ODF)?
- Яка роль оптичних муфт у ВОЛЗ?
- Яка різниця між пігтейлом і патчкордом?
- Для чого використовуються оптичні атенюатори?
- Яке призначення мультиплексорів та демультиплексорів?
- Порівняйте конструкцію волоконно-оптичних кабелів для зовнішнього (outdoor) та внутрішнього (indoor) прокладання за такими параметрами: тип оболонки (PE, PVC, LSZH), наявність броні (сталева стрічка, склопругки), гелевий заповнювач, стійкість до УФ, вологи, гризунів, температурного діапазону та механічних навантажень. У яких умовах доцільно використовувати кабель з LSZH-оболонкою, а коли з гелевим заповнювачем і подвійною бронею?
 - Опишіть типи полірування оптичних конекторів (PC, UPC, APC), вказавши кут нахилу торця (0° чи 8°), типові значення зворотних втрат (RL: -40 дБ, -55 дБ, -65 дБ), вставні втрати (IL: $<0,3$ дБ). Як вибір між SC/APC та LC/UPC впливає на сумісність із обладнанням PON (OLT, ONU) та якість сигналу в системах із високою чутливістю до відбиття?
 - Поясніть відмінності між оптичною муфтою та оптичним кросом (ODF), вказавши місце встановлення (підземний колодезь, стійка 19", ЦОД), функції (зварювання/комутація), типи кріплення волокон (сплайс-касети, адаптерні панелі). Як пігтейл із конектором SC/APC використовується при монтажі в ODF у порівнянні з патчкордом при підключенні активного обладнання?
 - Порівняйте оптичні мультиплексори/демультиплексори за технологією (CWDM, DWDM), вказавши кількість каналів, інтервал довжин хвиль та застосування (метро-мережі, магістралі, PON).

4. Активне обладнання оптичне обладнання

Активне оптичне обладнання можна поділити на:

- Оптичні приймачі-передавачі (трансивери)
- Медіаконвертери
- Підсилювачі потужності EDFA
- Технологія FTTx

• Мережні волоконно-оптичні системи передачі (це окремий вид обладнання, який частково буде розгдінутий в розділі 6 цього посібника).

4.1. Оптичні приймачі-передавачі

Приймачі-передавачі (трансивери, модулі) використовуються для приєднання плати мережного пристрою (комутатора, маршрутизатора або подібного пристрою) до оптичного волокна або неекранованої кручений пари, що виступають у ролі мережного кабелю.

4.1.1. Форм-фактори

Існує кілька стандартів оптичних приймачів.

GBIC - стандарт для трансиверів, що використовується разом із Gigabit Ethernet та волоконно-оптичними кабелями. Назва є акронімом GigaBit Interface Converter, що означає перетворювач гігабітного інтерфейсу. Як стандарт, що підтримує режим «гарячої» заміни, один гігабітний порт може забезпечувати передачу даних по різних фізичних середовищах, від мідного кабелю до довгохвильових одномодових волокон, на відстані десятків кілометрів.

Модуль SFP прийшов на зміну громіздкішому модулю GBIC. Модуль має роз'єм, який можна порівняти за розміром з роз'ємом RJ45, тобто дозволяє на 1 юніті (1U) 19-дюймового телекомунікаційного обладнання розмістити до 48 оптичних портів.

В основному для підключення до модуля використовується оптичний кабель з конектором (роз'ємом) типу LC. Хоча, зустрічаються винятки – наприклад, оптичні модулі для GPON-мережі мають один роз'єм SC і для дуплексної передачі використовує лише одну жилу. Також існує модулі з електричним інтерфейсом та роз'ємом RJ45.

Для використання в 10 Гбіт/с мережах з'явилися нові форм-фактори модулів XFP, X2, XENPAK, SFP+. Вони відрізняються більшими габаритами (особливо XFP, X2, XENPAK, а SFP+ за своїми розмірами ідентичен трансиверу SFP), стандартно використовуються роз'єми типу LC або SC. В мережах зі швидкістю 25 Гбіт/с використовуються трансивери SFP28.

В мережах зі швидкістю 40 і 100 Гбіт/с використовують трансивери QSFP, QSFP28, CFP, CFP2 відповідно вони відрізняються великими габаритами, стандартно використовуються роз'єми типу LC або MPO/MTP. В мережах з більшими швидкостями (200, 400 Гбіт/с) використовують оптичні трансивери QSFP-DD, OSFP.

Окремо треба згадати про DAC та AOC. DAC та AOC – це типи кабелів для високошвидкісного з'єднання між мережевими пристроями, особливо комутаторами, серверами та маршрутизаторами.

DAC (Direct Attach Cable) – кабель прямого підключення. Використовує мідний Twinaх-кабель. Має вбудовані роз'єми SFP+/QSFP+ на обох кінцях. DAC може бути пасивний або активний (з підсиленням сигналу). Довжина DAC-кабелю зазвичай до 10 метрів (після 5 метрів краще брати з підсиленням). Серед переваги DAC треба відмітити, що він дешевий, енергоефективний, має низьку затримку сигналу. Але має і обмежену дальність роботи.

AOC (Active Optical Cable) – активний оптичний кабель. Використовує оптичне волокно. Має вбудовані роз'єми SFP+/QSFP+ на обох кінцях (перетворюють електричний сигнал в оптичний і навпаки). Зазвичай довжина AOC складає від 1 метра до 30 метрів. До переваг слід віднести те, що він легкий, гнучкий, підтримує більші відстані ніж DAC. Але дорожчий за DAC орієнтовно на 20-30%.



Ці кабелі часто використовуються як альтернатива окремим SFP/QSFP-модулям і патчкордам, особливо в серверних стійках для економії місця, енергії та бюджету.

Підвидом DAC або AOC є так звані "гідри".




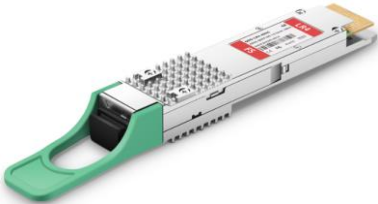

Гідри DAC або AOC (англ. Hydra cable) - це розгалужений кабель, який має на одному кінці (наприклад, QSFP+) і 4×SFP+ на іншому. Це дозволяє одному порту високої швидкості обслуговувати кілька портів нижчої швидкості. Але варто пам'ятати, що не все активне телекомунікаційне обладнання може працювати з гідрами.

Більш детально відповідність оптичних трансиверів та швидкостей наведена в табл. 4.1.


Табл. 4.1. Типи оптичних трансиверів (модулів).

<p>GBIC (1 Гбіт/с)</p>	
<p>SFP (100 Мбіт/с або 1 Гбіт/с)</p>	

<p>SFP+ (10 Γbit/c)</p>	
<p>XFP (10 Γbit/c)</p>	
<p>X2 (10 Γbit/c)</p>	
<p>XENPAK (10 Γbit/c)</p>	

SFP28 (25 Γbit/c)	
QSFP (40 Γbit/c)	
QSFP28 (100 Γbit/c)	
QSFP-DD (400 Γbit/c)	
OSFP (400 Γbit/c)	

<p>CFP (100 Γβιτ/ε)</p>	
<p>CFP2 (200/400 Γβιτ/ε)</p>	
<p>CFP4 (100 Γβιτ/ε)</p>	
<p>CFP8 (400 Γβιτ/ε)</p>	
<p>DAC SFP+ (10 Γβιτ/ε)</p>	

<p>DAC QSFP (40 Гбіт/с)</p>	
<p>AOC QSFP (40 Гбіт/с)</p>	
<p>AOC 100G QSFP28 (100 Гбіт/с)</p>	
<p>Гідра AOC QSFP (40 Гбіт/с) на 4*10 SFP+ (4*10Гбіт/с)</p>	
<p>Гідра DAC QSFP (40 Гбіт/с) на 4*10 SFP+ (4*10Гбіт/с)</p>	

В таблиці 4.2. неведені загальноприйняті скорочення робочих дальностей, які вказуються на оптичних трансиверах, а також наведено призначення (сфера застосування) для оптичних трансиверів з типовими дальностями роботи.

Табл. 4.2. Загальноприйняті скорочення робочих дальностей.

Тип	Дальність	Призначення
SR	до 100 м (на MMF)	<p>Використовується для коротких підключень всередині або між стійками в одному приміщенні. Застосовується багатомодове волокно, наприклад, OM3/OM4. Ідеальний варіант для ЦОД.</p>
FR	до 2 км.	<p>Підходить для підключень між корпусами або ЦОД, всередині кампуса. Знаходить застосування у коротких магістралях.</p>
LR	до 10 км	<p>Вважається одним із найпопулярніших. Використовують для з'єднання між мережними вузлами та міськими зв'язками. Працює із одномодовим волокном.</p>
ER	до 40 км.	<p>Використовується для віддалених та міжміських з'єднань. Але для справної роботи необхідне якісне волокно, іноді підсилювачі.</p>
ZR	до 80 км	<p>Підходить для магістральних та операторських мереж. Потрібно використовувати підсилювачі.</p>

В таблиці 4.3. наведені типові значення (характеристики) для різних типів трансиверів: довжина хвилі, дальність роботи, вихідна потужність передавача та чутливість приймача. Саме ці параметри є основними при розрахуванні оптичного бюджету, про який згадувалось в розділ 2.5.

Табл. 4. 3.. Типові характеристики оптичних трансиверів модулів).

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
155Mbps dual LC SFP OC-3/STM-1SONET/SDH				
ITBSF-DL-1E-X02-D-85	850nm	2km	-10~-3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1E-X02-D	1310nm	2km	-15~-8dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-DL-1E-X20-D	1310nm	20km	-15~-8dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-DL-1E-X40-D	1310nm	40km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-DL-1E-X80-D	1550nm	80km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
622Mbps dual LC SFP OC-12/STM-4SONET/SDH				
ITBSF-DL-6E-X80-D	1550nm	80km	-3~+2dBm	≤-28.0dBm
ITBSF-DL-6E-X40-D	1310nm	40km	-3~+2dBm	≤-28.0dBm
ITBSF-DL-6E-X20-D	1310nm	20km	-15~-8dBm	≤-28.0dBm
ITBSF-DL-6E-X02-D	1310nm	2km	-15~-8dBm	≤-28.0dBm
1.244Gbps dual LC SFP&CWDM, DWDM OC-24SONET				
ITBSF-DL-1G-XX5-D	850nm	550m	-9~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-1G-X02-D	1310nm	2km	-9~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-1G-X20-D	1310nm	20km	-9~-3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D	1310nm	40km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-15	1550nm	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D	1550nm	80km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D	1550nm	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-Cxx	1270~1610nm	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-Dxx	DWDM	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D-Cxx	1270~1610nm	80km	0~+5dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D-Dxx	DWDM	80km	0~+5dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D-Cxx	1270~1610nm	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D-Dxx	DWDM	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
155Mbps SC BIDI SFP OC-3/STM-1SONET/SDH				
ITBSF-SS-1E-X20-D-53	Тх1550/Рх1310	20km	-15~-8дВм	≤-34.0дВм
ITBSF-SS-1E-X20-D-35	Тх1310/Рх1550	20km	-15~-8дВм	≤-34.0дВм
ITBSF-SS-1E-X40-D-53	Тх1550/Рх1310	40km	-5~0дВм	≤-34.0дВм
ITBSF-SS-1E-X40-D-35	Тх1310/Рх1550	40km	-5~0дВм	≤-34.0дВм
ITBSF-SS-1E-X80-D-54	Тх1550/Рх1490	80km	-5~0дВм	≤-34.0дВм
ITBSF-SS-1E-X80-D-45	Тх1490/Рх1550	80km	-5~0дВм	≤-34.0дВм
1.244Gbps SC BIDI SFP OC-24 SONET				
ITBSF-SS-1G-XX5-D-35	Тх1310/Рх1550	500m	-9~-3дВм	≤-21.0дВм
ITBSF-SS-1G-XX5-D-53	Тх1550/Рх1310	500m	-9~-3дВм	≤-21.0дВм
ITBSF-SS-1G-X03-D-35	Тх1310/Рх1550	3km	-9~-3дВм	≤-21.0дВм
ITBSF-SS-1G-X03-D-53	Тх1550/Рх1310	3km	-9~-3дВм	≤-21.0дВм
ITBSF-SS-1G-X20-D-35	Тх1310/Рх1550	20km	-9~-3дВм	≤-23.0дВм
ITBSF-SS-1G-X20-D-53	Тх1550/Рх1310	20km	-9~-3дВм	≤-23.0дВм
ITBSF-SS-1G-X20-D-34	Тх1310/Рх1490	20km	-9~-3дВм	≤-23.0дВм
ITBSF-SS-1G-X20-D-43	Тх1490/Рх1310	20km	-9~-3дВм	≤-23.0дВм
ITBSF-SS-1G-X40-D-35	Тх1310/Рх1550	40km	-2~+3дВм	≤-23.0дВм
ITBSF-SS-1G-X40-D-53	Тх1550/Рх1310	40km	-2~+3дВм	≤-23.0дВм
ITBSF-SS-1G-X40-D-34	Тх1310/Рх1490	40km	-2~+3дВм	≤-23.0дВм
ITBSF-SS-1G-X40-D-43	Тх1490/Рх1310	40km	-2~+3дВм	≤-23.0дВм
ITBSF-SS-1G-X80-D-45	Тх1490/Рх1550	80km	-2~+3дВм	≤-24.0дВм
ITBSF-SS-1G-X80-D-54	Тх1550/Рх1490	80km	-2~+3дВм	≤-24.0дВм
ITBSF-SS-1G-120-D-45	Тх1490/Рх1550	120km	-1~+4дВм	≤-32.0дВм
ITBSF-SS-1G-120-D-54	Тх1550/Рх1490	120km	-1~+4дВм	≤-32.0дВм
2.488Gbps BIDI SC SFP OC-48/STM-16SONET/SDH				
ITBSF-SS-2G-X02-D-35	Тх1310/Рх1550	2km	-10~-3дВм	≤-18.0дВм
ITBSF-SS-2G-X02-D-53	Тх1550/Рх1310	2km	-10~-3дВм	≤-18.0дВм
ITBSF-SS-2G-X20-D-35	Тх1310/Рх1550	20km	-5~0дВм	≤-18.0дВм
ITBSF-SS-2G-X20-D-53	Тх1550/Рх1310	20km	-5~0дВм	≤-18.0дВм
ITBSF-SS-2G-X20-D-34	Тх1310/Рх1490	20km	-5~0дВм	≤-18.0дВм
ITBSF-SS-2G-X20-D-43	Тх1490/Рх1310	20km	-5~0дВм	≤-18.0дВм
ITBSF-SS-2G-X40-D-35	Тх1310/Рх1550	40km	-2~-3дВм	≤-18.0дВм
ITBSF-SS-2G-X40-D-53	Тх1550/Рх1310	40km	-2~-3дВм	≤-18.0дВм
ITBSF-SS-2G-X80-D-45	Тх1490/Рх1550	80km	-2~-3дВм	≤-28.0дВм
ITBSF-SS-2G-X80-D-54	Тх1550/Рх1490	80km	-2~-3дВм	≤-28.0дВм

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
155Mbps LC BIDI SFP OC-3/STM-1SONET/SDH				
ITBSF-SL-1E-X20-D-53	Tx1550/Rx1310	20km	-15~-8dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X20-D-35	Tx1310/Rx1550	20km	-15~-8dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X40-D-53	Tx1550/Rx1310	40km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X40-D-35	Tx1310/Rx1550	40km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X80-D-54	Tx1550/Rx1490	80km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X80-D-45	Tx1490/Rx1550	80km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
1.244Gbps LC BIDI SFP OC-24SONET				
ITBSF-SL-1G-X03-D-35	Tx1310/Rx1550	3km	-9~-3dBm	≤-21.0dBm
ITBSF-SL-1G-X03-D-53	Tx1550/Rx1310	3km	-9~-3dBm	≤-21.0dBm
ITBSF-SL-1G-XX5-D-35	Tx1310/Rx1550	500m	-9~-3dBm	≤-21.0dBm
ITBSF-SL-1G-XX5-D-53	Tx1550/Rx1310	500m	-9~-3dBm	≤-21.0dBm
ITBSF-SL-1G-X20-D-35	Tx1310/Rx1550	20km	-9~-3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SL-1G-X20-D-53	Tx1550/Rx1310	20km	-9~-3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SL-1G-X20-D-34	Tx1310/Rx1490	20km	-9~-3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X20-D-43	Tx1490/Rx1310	20km	-9~-3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X40-D-35	Tx1310/Rx1550	40km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X40-D-53	Tx1550/Rx1310	40km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X40-D-34	Tx1310/Rx1490	40km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X40-D-43	Tx1490/Rx1310	40km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X80-D-45	Tx1490/Rx1550	80km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X80-D-54	Tx1550/Rx1490	80km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SL-1G-120-D-45	Tx1490/Rx1550	120km	-1~+4dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-SL-1G-120-D-54	Tx1550/Rx1490	120km	-1~+4dBm	≤-32.0dBm
2.488Gbps BIDI LC SFP OC-48/STM-16SONET/SDH				
ITBSF-SL-2G-X20-D-35	Tx1310/Rx1550	20km	-10~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-SL-2G-X20-D-53	Tx1550/Rx1310	20km	-10~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-SL-2G-X20-D-34	Tx1310/Rx1490	20km	-5~0dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-SL-2G-X20-D-43	Tx1490/Rx1310	20km	-5~0dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-SL-2G-X40-D-45	Tx1490/Rx1550	40km	-2~+3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-SL-2G-X40-D-54	Tx1550/Rx1490	40km	-2~+3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-SL-2G-X80-D-45	Tx1490/Rx1550	80km	-2~+3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-SL-2G-X80-D-54	Tx1550/Rx1490	80km	-2~+3dBm	≤-18.0dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
125Mbps dual LC SFP 100BASE-X				
ITBSF-DL-1E-X02-D-85	850nm	2km	-10~-3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1E-X02-D	1310nm	2km	-15~-8dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-DL-1E-X20-D	1310nm	20km	-15~-8dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-DL-1E-X40-D	1310nm	40km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-DL-1E-X80-D	1550nm	80km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
1.25Gbps dual LCSFP&CWDM, DWDM 1000BASE-X				
ITBSF-DL-1G-XX5-D	850nm	550m	-9~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-1G-X02-D	1310nm	2km	-9~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-1G-X20-D	1310nm	20km	-9~-3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D	1310nm	40km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-15	1550nm	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D	1550nm	80km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D	1550nm	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-Cxx	1270~1610nm	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-Dxx	DWDM	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D-Cxx	1270~1610nm	80km	0~+5dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D-Dxx	DWDM	80km	0~+5dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D-Cxx	1270~1610nm	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D-Dxx	DWDM	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
125Mbps SC BIDI SFP 100BASE-X				
ITBSF-SS-1E-X20-D-53	Tx1550/Rx1310	20km	-15~-8dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SS-1E-X20-D-35	Tx1310/Rx1550	20km	-15~-8dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SS-1E-X40-D-53	Tx1550/Rx1310	40km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SS-1E-X40-D-35	Tx1310/Rx1550	40km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SS-1E-X80-D-54	Tx1550/Rx1490	80km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
ITBSF-SS-1E-X80-D-45	Tx1490/Rx1550	80km	-5~0dBm	≤-34.0dBm
1.25Gbps SC BIDI SFP 1000BASE-X				
ITBSF-SS-1G-X03-D-35	Tx1310/Rx1550	3km	-9~-3dBm	≤-21.0dBm
ITBSF-SS-1G-X03-D-53	Tx1550/Rx1310	3km	-9~-3dBm	≤-21.0dBm
ITBSF-SS-1G-X20-D-35	Tx1310/Rx1550	20km	-9~-3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SS-1G-X20-D-53	Tx1550/Rx1310	20km	-9~-3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SS-1G-X20-D-34	Tx1310/Rx1490	20km	-9~-3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SS-1G-X20-D-43	Tx1490/Rx1310	20km	-9~-3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SS-1G-X40-D-35	Tx1310/Rx1550	40km	-2~+3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SS-1G-X40-D-53	Tx1550/Rx1310	40km	-2~+3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SS-1G-X40-D-34	Tx1310/Rx1490	40km	-2~+3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SS-1G-X40-D-43	Tx1490/Rx1310	40km	-2~+3dBm	≤-23.0dBm
ITBSF-SS-1G-X80-D-45	Tx1490/Rx1550	80km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SS-1G-X80-D-54	Tx1550/Rx1490	80km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-SS-1G-120-D-45	Tx1490/Rx1550	120km	-1~+4dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-SS-1G-120-D-54	Tx1550/Rx1490	120km	-1~+4dBm	≤-32.0dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
125Mbps LC BIDI SFP 100BASE-X				
ITBSF-SL-1E-X20-D-53	Tx1550/Rx1310	20km	-15~-8dBm	≤ -34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X20-D-35	Tx1310/Rx1550	20km	-15~-8dBm	≤ -34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X40-D-53	Tx1550/Rx1310	40km	-5~0dBm	≤ -34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X40-D-35	Tx1310/Rx1550	40km	-5~0dBm	≤ -34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X80-D-54	Tx1550/Rx1490	80km	-5~0dBm	≤ -34.0dBm
ITBSF-SL-1E-X80-D-45	Tx1490/Rx1550	80km	-5~0dBm	≤ -34.0dBm
1.25Gbps LC BIDI SFP 1000BASE-X				
ITBSF-SL-1G-X03-D-35	Tx1310/Rx1550	3km	-9~-3dBm	≤ -21.0dBm
ITBSF-SL-1G-X03-D-53	Tx1550/Rx1310	3km	-9~-3dBm	≤ -21.0dBm
ITBSF-SL-1G-X20-D-35	Tx1310/Rx1550	20km	-9~-3dBm	≤ -23.0dBm
ITBSF-SL-1G-X20-D-53	Tx1550/Rx1310	20km	-9~-3dBm	≤ -23.0dBm
ITBSF-SL-1G-X20-D-34	Tx1310/Rx1490	20km	-9~-3dBm	≤ -24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X20-D-43	Tx1490/Rx1310	20km	-9~-3dBm	≤ -24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X40-D-35	Tx1310/Rx1550	40km	-2~+3dBm	≤ -24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X40-D-53	Tx1550/Rx1310	40km	-2~+3dBm	≤ -24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X40-D-34	Tx1310/Rx1490	40km	-2~+3dBm	≤ -24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X40-D-43	Tx1490/Rx1310	40km	-2~+3dBm	≤ -24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X80-D-45	Tx1490/Rx1550	80km	-2~+3dBm	≤ -24.0dBm
ITBSF-SL-1G-X80-D-54	Tx1550/Rx1490	80km	-2~+3dBm	≤ -24.0dBm
ITBSF-SL-1G-120-D-45	Tx1490/Rx1550	120km	-1~+4dBm	≤ -32.0dBm
ITBSF-SL-1G-120-D-54	Tx1550/Rx1490	120km	-1~+4dBm	≤ -32.0dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
3Gbps dual LC SFP CPRI&OBSAI				
ITBSF-DL-3G-XX3-D	850nm	300m	-10~-3dBm	≤-17.0dBm
ITBSF-DL-3G-X02-D	1310nm	2km	-10~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-3G-X20-D	1310nm	20km	-5~0dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-3G-X40-D	1550nm	40km	-5~0dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-3G-X40-D-Cxx	1270~1610nm	40km	0~5dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-3G-X40-D-Dxx	DWDM	40km	0~5dBm	≤-18.0dBm
6Gbps dual LC SFP CPRI&OBSAI				
ITBSF-DL-6G-XX3-D	850nm	300m	-8~-1dBm	≤-12.0dBm
ITBSF-DL-6G-X02-D	1310nm	2km	-8~-1dBm	≤-14.5dBm
ITBSF-DL-6G-X20-D	1310nm	20km	-4~+1dBm	≤-14.5dBm
ITBSF-DL-6G-X40-D	1310nm	40km	-1~+4dBm	≤-16.0dBm
ITBSF-DL-6G-X40-D-Cxx	1270~1610nm	40km	-4~1dBm	≤-15.0dBm
ITBSF-DL-6G-X40-D-Dxx	DWDM	40km	-4~1dBm	≤-15.0dBm
3Gbps BIDI LC SFP CPRI&OBSAI				
ITBSF-SL-3G-X20-D-35	Tx1310/Rx1550	20km	-5~0dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-SL-3G-X20-D-53	Tx1550/Rx1310	20km	-5~0dBm	≤-18dBm
6Gbps BIDI LC SFP CPRI&OBSAI				
ITBSF-SL-6G-X20-D-23	Tx1270/Rx1330	20km	-4~+1dBm	≤-14.5dBm
ITBSF-SL-6G-X20-D-32	Tx1300/Rx1270	20km	-4~+1dBm	≤-14.5dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
1Gbps SFP FC				
ITBSF-DL-1G-XX5-D	850nm	550m	-9~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-1G-X02-D	1310nm	2km	-9~-3dBm	≤-18.0dBm
ITBSF-DL-1G-X20-D	1310nm	20km	-9~-3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D	1310nm	40km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-15	1550nm	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D	1550nm	80km	-2~+3dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D	1550nm	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-Cxx	1270~1610nm	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X40-D-Dxx	DWDM	40km	-5~0dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D-Cxx	1270~1610nm	80km	0~+5dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-X80-D-Dxx	DWDM	80km	0~+5dBm	≤-24.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D-Cxx	1270~1610nm	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm
ITBSF-DL-1G-120-D-Dxx	DWDM	120km	0~+5dBm	≤-32.0dBm
2Gbps SFP FC				
ITBSF-DL-2G-XX3-D	850nm	300m	-9~-3dBm	≤-17.0dBm
ITBSF-DL-2G-X10-D	1310nm	10km	-9~-3dBm	≤-20.0dBm
ITBSF-DL-2G-X40-D	1310nm	40km	0~+5dBm	≤-21.0dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
ITBSF-DL-2G-X80-D	1550nm	80km	0~+5dBm	≤ -21.0dBm
ITBSF-DL-2G-X40-D-Cxx	1270~1610nm	40km	0~+5dBm	≤ -21.0dBm
ITBSF-DL-2G-X80-D-Cxx	1270~1610nm	80km	0~+5dBm	≤ -28.0dBm
ITBSF-DL-2G-X40-D-Dxx	DWDM	40km	0~+50dBm	≤ -21.0dBm
ITBSF-DL-2G-X80-D-Dxx	DWDM	80km	0~+5dBm	≤ -28.0dBm
4Gbps SFP FC				
ITBSF-DL-4G-XX1-D	850nm	150m	-9~-3dBm	≤ -16.0dBm
ITBSF-DL-4G-X04-D	1310nm	4km	-9~-3dBm	≤ -17.0dBm
ITBSF-DL-4G-X10-D	1310nm	10km	-5~0dBm	≤ -18.0dBm
ITBSF-DL-4G-X40-D	1550nm	40km	0~+5dBm	≤ -18.0dBm
ITBSF-DL-4G-X40-D-Cxx	1270~1610nm	40km	0~+5dBm	≤ -18.0dBm
ITBSF-DL-4G-X40-D-Dxx	DWDM	40km	0~+50dBm	≤ -18.0dBm
ITBSF-DL-4G-X80-D-Dxx	DWDM	80km	0~+5dBm	≤ -23.0dBm
8Gbps SFP FC				
ITBSF-DL-8G-XX1-D	850nm	150m	-8.2~-1dBm	≤ -11.5dBm
ITBSF-DL-8G-X10-D	1310nm	10km	-8.2~0.5dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-DL-8G-X40-D	1550nm	40km	-4.7~+4dBm	≤ -16.0dBm
ITBSF-DL-8G-X80-D	1550nm	80km	0~+5dBm	≤ -23.0dBm
ITBSF-DL-8G-X40-D-Cxx	1470~1610nm	40km	-4.7~+4dBm	≤ -16.0dBm
ITBSF-DL-8G-X80-D-Dxx	DWDM	80km	-4.7~+4dBm	≤ -23.0dBm
ITBSF-DL-8G-120-D-Dxx	DWDM	120km	0~+5dBm	≤ -24.0dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
10G SFP+ dual LC 10G Ethernet & SONET/SDH & 10G Fiber channel				
ITBSF-DL-XG-XX3-D	850nm	300m	-8.2~-1dBm	≤ -11.5dBm
ITBSF-DL-XG-XX2-D	1310nm	220m	-8.2~+0.5dBm	≤ -12.6dBm
ITBSF-DL-XG-X02-D	1310nm	2km	-8.2~+0.5dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-DL-XG-X10-D	1310nm	10km	-8.2~+0.5dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-DL-XG-X40-D	1550nm	40km	-1~+4dBm	≤ -16.0dBm
ITBSF-DL-XG-X80-D	1550nm	80km	0~+5dBm	≤ -23.0dBm
ITBSF-DL-XG-120-D	1550nm	120km	0~+5dBm	≤ -24.0dBm
10G SFP+ simplex LC 10G Ethernet & SONET/SDH & 10G Fiber channel				
ITBSF-SL-XG-X10-D-23	TX1270/RX1330	10km	-8.2~+0.5dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-SL-XG-X10-D-32	TX1330/RX1270	10km	-8.2~+0.5dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-SL-XG-X20-D-23	TX1270/RX1330	20km	-2~+3dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-SL-XG-X20-D-32	TX1330/RX1270	20km	-2~+3dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-SL-XG-X40-D-23	TX1270/RX1330	40km	0~+5dBm	≤ -16.0dBm
ITBSF-SL-XG-X40-D-32	TX1330/RX1270	40km	0~+5dBm	≤ -16.0dBm
ITBSF-SL-XG-X60-D-23	TX1270/RX1330	60km	0~+5dBm	≤ -22.0dBm
ITBSF-SL-XG-X60-D-32	TX1330/RX1270	60km	0~+5dBm	≤ -22.0dBm
10G SFP+ CWDM&DWDM 10G Ethernet & SONET/SDH & 10G Fiber channel				
ITBSF-DL-XG-X10-D-Cxx	1270~1450nm	10km	-8.2~+0.5dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-DL-XG-X20-D-Cxx	1270~1450nm	20km	-2~+3dBm	≤ -14.5dBm
ITBSF-DL-XG-X40-D-Cxx	1270~1610nm	40km	-1~+4dBm	≤ -16dBm
ITBSF-DL-XG-X40-D-Dxx	1470~1610nm	40km	-1~+4dBm	≤ -16dBm
ITBSF-DL-XG-X60-D-Cxx	1270~1450nm	60km	0~+5dBm	≤ -22.0dBm
ITBSF-DL-XG-X80-D-Cxx	1470~1610nm	80km	0~+5dBm	≤ -23.0dBm
ITBSF-DL-XG-X40-D-Dxx	DWDM	40km	-1~+4dBm	≤ -16.0dBm
ITBSF-DL-XG-X80-D-Dxx	DWDM	80km	0~+5dBm	≤ -23.0dBm
ITBSF-DL-XG-120-D-Dxx	DWDM	120km	0~+5dBm	≤ -24.0dBm

парт-номер	длины волн	дальность	исх. мощность	чувствит-ть
10G XFP dual LC 10G Ethernet & SONET/SDH & 10G Fiberchannel				
1TBXF-DL-XG-XX3-D	850nm	300m	-8.2~-1dBm	≤ -12.6dBm
1TBXF-DL-XG-XX2-D	1310nm	220m	-8.2~+0.5dBm	≤ -6.5dBm
1TBXF-DL-XG-X02-D	1310nm	2km	-8.2~+0.5dBm	≤ -12.6dBm
1TBXF-DL-XG-X10-D	1310nm	10km	-8.2~+0.5dBm	≤ -12.6dBm
1TBXF-DL-XG-X40-D	1550nm	40km	-1~+4dBm	≤ -16.0dBm
1TBXF-DL-XG-X80-D	1550nm	80km	0~+5dBm	≤ -24.0dBm
1TBXF-DL-XG-120-D	1550nm	120km	0~+5dBm	≤ -24.0dBm
10G XFP simplex LC 10G Ethernet & SONET/SDH & 10G Fiber channel				
1TBXF-SL-XG-X10-D-23	TX1270/RX1330	10km	-6~0dBm	≤ -14.0dBm
1TBSF-SL-XG-X10-D-32	TX1330/RX1270	10km	-6~+0dBm	≤ -14.0dBm
1TBXF-SL-XG-X20-D-23	TX1270/RX1330	20km	-2~+3dBm	≤ -14.5dBm
1TBXF-SL-XG-X20-D-32	TX1330/RX1270	20km	-2~+3dBm	≤ -14.5dBm
1TBXF-SL-XG-X40-D-23	TX1270/RX1330	40km	-2~+3dBm	≤ -16.0dBm
1TBXF-SL-XG-X40-D-32	TX1330/RX1270	40km	-2~+3dBm	≤ -16.0dBm
1TBXF-SL-XG-X60-D-23	TX1270/RX1330	60km	0~+5dBm	≤ -20.0dBm
1TBXF-SL-XG-X60-D-32	TX1330/RX1270	60km	0~+5dBm	≤ -20.0dBm

4.1.2. Типи лазерів

В залежності від типу, дальності та робочих довжин хвиль в передавачах трансиверів використовуються різні типи лазерів. Основні типи лазерів та їх характеристики наведені нижче.

Вертикально-випромінюючий лазер з вертикальним резонатором (VCSEL) – це різновид діодного напівпровідникового лазера, що випромінює світло в напрямку, перпендикулярному поверхні кристала, на відміну від звичайних лазерних діодів, що випромінюють у площині, паралельної поверхні. Принцип побудови лазера показаний на рис. 4.1.

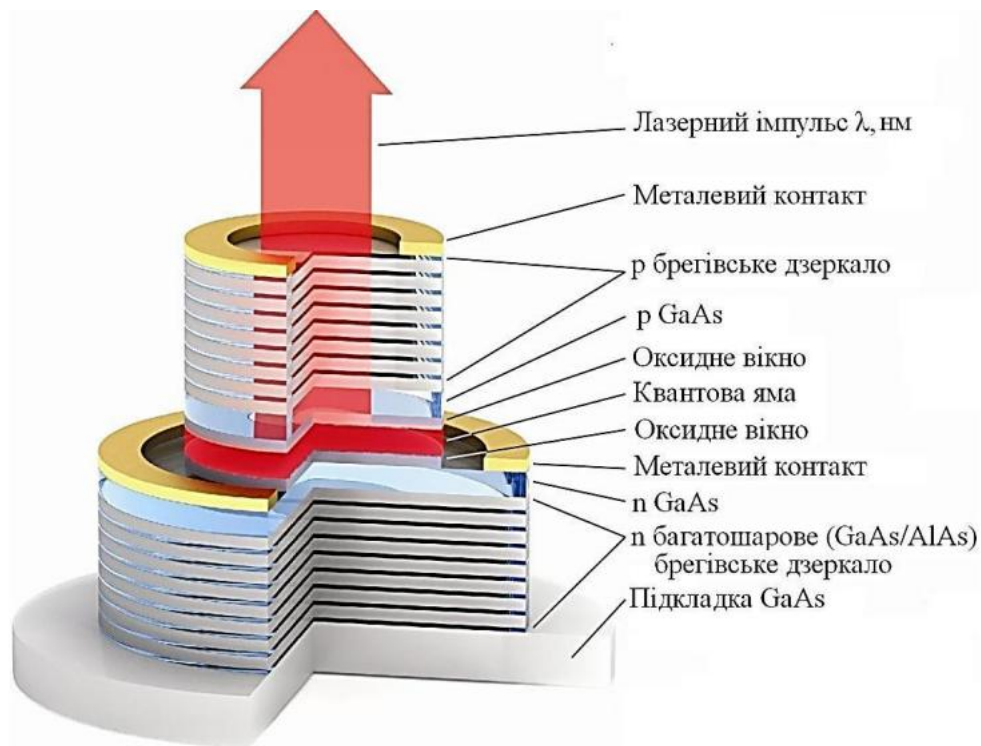


Рис. 4.1. Принцип побудови лазера.

Застосовується для багатомодової передачі даних на довжині хвилі 850 нм, на відстань до 2 км при 100 Мбіт/с передачі та на відстань 550 м при 1 та 10 Гбіт/с передачі.

Лазер із резонатором Фабрі-Перо (FP) – це оптичний пристрій, у якому два співвісні паралельні дзеркала формують резонатор. Між ними виникає стояча оптична хвиля завдяки багаторазовим відбиттям. Дзеркала мають високий коефіцієнт відбиття (більше 90%), але одне з них – частково прозоре, що дозволяє сформованому лазерному пучку "вийти" з резонатора. Така конфігурація дозволяє створити резонансну підсилюючу камеру, яка визначає спектральні властивості лазера.

Застосовується для одномодової передачі на довжині хвилі 1310 нм, на відстань до 10 км.

Лазер з розподілим зворотним зв'язком (DFB) – інжекційний напівпровідниковий лазер, зворотний зв'язок у якому створюється за рахунок відбиття світлових хвиль від періодичних ґрат, створюваних в активному середовищі.

Застосовується в одномодовій передачі в широкому діапазоні довжин хвиль (частотні плани CWDM, DWDM). Дальність роботи таких лазерів на відстані до 120 км.

4.1.3. Функціональність Digital Diagnostic

Функція цифрової діагностики дозволяє в режимі реального часу бачити потужність, випромінювану лазером передавача. Модулі також вимірюють

оптичну потужність на приймачі, що дозволяє своєчасно відстежувати стан «бюджету» оптичної лінії, і робити відповідні дії до того, як станеться аварія.

Важливим фактором в експлуатації мережі є параметри напруги живлення та температури, які важливі для керування мережею. Цифрова діагностика дозволяє в режимі «реального часу» відстежувати напругу живлення та температуру кожного оптичного трансивера, а також встановлювати порогові значення та сповіщення про їхнє досягнення.

Кожен модуль має свою власну електронну мітку, де міститься інформація про ідентифікаційний номер пристрою та специфікацію зовнішнього порту. Інформація про зовнішній порт може включати дані про довжину хвилі, швидкість передачі даних, підтримувані протоколи, а також про довжину каналу. Ця функціональність корисна при інвентаризації, з її допомогою відстежується встановлення та заміна компонентів та можливість визначення місця знаходження того чи іншого модуля.

4.2. Медіаконвертери

Такий пристрій, як медіаконвертер дозволяє перетворити середу передачі інформаційного сигналу з волоконно-оптичного кабелю в виту мідну пару і навпаки. Медіаконвертери (рис. 4.2.) традиційно мають два порти для підключення пристроїв. Також є версії з великою кількістю портів, але вони зазвичай виконані у вигляді плат, що встановлюються в шасі медіаконверторів. Підключення по витій парі здійснюється за допомогою конектора RJ-45, а волоконно-оптичного кабелю через оптичний конектор SC або LC в залежності від типу медіаконвертера і оптичного приймача. Відповідно до специфікації IEEE 803.2 довжина мідного сегмента – вітої пари, не має перевищувати 100 м. З іншого боку оптичний сигнал може бути переданий на відстань до 5 км по багатомодовому чи відстань до 120 км по одномодовому волокну. Цей параметр визначається типом оптичного модуля, який встановлено в медіаконвертер.

Їх функціональність досить обмежена, оскільки цей пристрій працює тільки фізично. Хоча у функціональності є кілька особливостей, які можуть бути критичними під час роботи медіаконвертерів. Якщо оператор зв'язку або постачальник послуг пропонує своїм абонентам послуги IPTV, VoIP, а для передачі інформації використовує VLAN і вибудовує пріоритети QoS, важливою функціональністю медіаконвертера буде підтримка пакетів великої довжини.

IPTV (Internet Protocol Television) – телебачення по протоколу IP. Передача телевізійного відео через комп'ютерні мережі (зазвичай Ethernet/IP) замість традиційного кабелю чи супутника. Передача здійснюється у вигляді потокового відео (streaming). Часто вимагає високого пріоритету QoS для уникнення затримок і втрат кадрів.

VoIP (Voice over IP) – голос через IP-протокол. Технологія передачі голосових даних (дзвінків) через комп'ютерну мережу замість традиційної

телефонної лінії. Використовує пакетну передачу - голос розбивається на пакети, які передаються IP-мережею. Критично залежить від низької затримки, тому QoS тут - надважливий.

VLAN (Virtual Local Area Network) – віртуальна локальна мережа. Технологія, яка дозволяє логічно розділити фізичну мережу на окремі сегменти. IPTV і VoIP часто виділяються в окремі VLAN для контролю трафіку. Це допомагає уникнути змішування з іншими типами даних.

QoS (Quality of Service) – якість обслуговування. Механізми, які задають пріоритети для різних типів мережевого трафіку. Наприклад, VoIP отримує найвищий пріоритет, бо затримки навіть у мілісекундах впливають на якість розмови. IPTV теж вимагає гарантовану пропускну здатність - щоб відео не "підвисало".

Якщо медіаконвертер використовується як абонентський пристрій для підключення клієнта, важливою особливістю буде підтримка різних стандартів (швидкостей передачі даних) на мідному Ethernet інтерфейсі, а також можливість провести тестування стану абонентської лінії. Якщо медіаконвертери експлуатуються поза приміщеннями, основною вимогою до них буде стійкість до зовнішніх кліматичних факторів (робоча температура, вологість, які дозволяють йому працювати в екстремальних умовах).

Медіаконвертери WDM додатково обладнані пасивним спектральним мультиплексором, який дозволяє об'єднати/роз'єднати кілька оптичних сигналів на різних довжинах хвиль в одне волокно. Традиційно медіаконвертер WDM передає сигнал на довжині хвилі 1310 нм, а приймає на довжині хвилі 1550 нм. З іншого боку оптичної лінії все навпаки. WDM медіаконвертери можуть передавати інформацію на інших довжинах хвиль, таких як 1490/1550 при передачі інформації на великі відстані.

Також є медіаконвертери під установку SFP модуля. Особливістю такого медіа конвертера є наявність слоту для встановлення змінного оптичного модуля SFP. Встановлюючи різні оптичні модулі, зрештою можна отримати як 100Мбіт/с, 1Гбіт/с або 10Гбіт/с на різну відстань передачі.



Рис. 4.2. Медіаконвертери чеської компанії Optokon.

4.3. Підсилювачи потужності EDFA

EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier) – волоконно-оптичний підсилювач на оптичному волокні, легованому іонами ербію. Застосовується у волоконно-оптичних лініях для відновлення рівня оптичного сигналу. Перевагою ербієвих підсилювачів є відсутність перетворення в електричний сигнал, можливість одночасного посилення сигналів з різними довжинами хвиль (що зумовлює можливість посилення спектрально мультіплексованого сигналу), практично точну відповідність робочого діапазону ербієвих підсилювачів області

мінімальних оптичних втрат оптичних волокон на основі кварцового скла. На рис. 4.3. показаний EDFA-підсилювач чеської компанії Optokon.



Рис. 4.3. EDFA-підсилювач чеської компанії Optokon.

Підсилення відбувається завдяки збудженню іонів ербію потужним світлом накачування (зазвичай 980 або 1480 нм). При проходженні сигналу крізь активну область, іони ербію повертаються в нижчий енергетичний стан, виділяючи когерентні фотони, що збігаються з сигналом – таким чином сигнал посилюється вздовж напрямку передачі (рис. 4.4.).

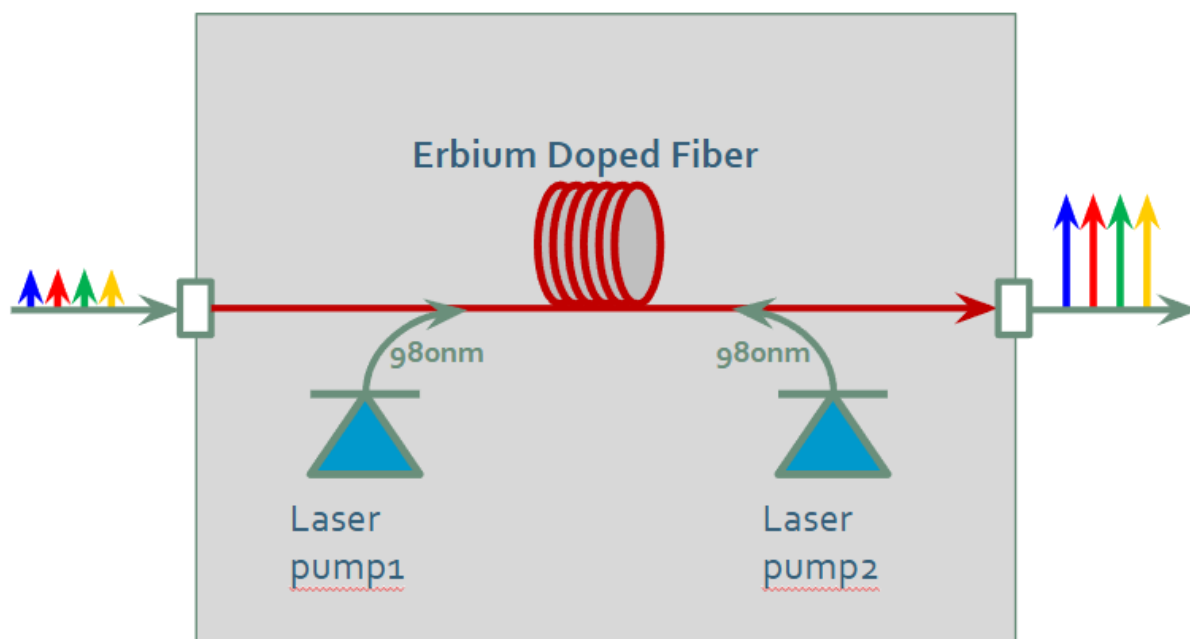


Рис. 4.4. Принцип роботи EDFA-підсилювача.

Для уникнення зворотних відбиттів, які можуть дестабілізувати EDFA, на виході встановлюється оптичний ізолятор.

EDFA можуть бути виконані як окремими пристроями для розміщення у рековій 19-дюймовій стійці, так і у вигляді окремих плат (лінійних карт) які вставляються в шасійні пристрої, що дозволяє більш гнучко вирішувати задачі.

Залежно від застосування розрізняють такі види EDFA:

- попередні підсилювачі
- лінійні підсилювачі
- підсилювачі потужності

Попередні підсилювачі (Pre-amplifier EDFA) встановлюються безпосередньо перед приймачем регенератора і сприяють збільшенню відношення сигнал/шум на виході електронного посилювального каскаду в оптоелектронному приймачі. Оптичні підсилювачі часто використовуються як заміна складних і зазвичай дорогих когерентних оптичних приймачів.

Лінійні підсилювачі (Line EDFA) встановлюються в проміжних точках протяжних ліній зв'язку між регенераторами або на виході оптичних розгалужувачів з метою компенсації послаблення сигналу, яке відбувається через згасання в оптичному волокні або розгалуження в оптичних розгалужувачах, відгалужувачах, мультиплексорах WDM. Лінійні підсилювачі замінюють оптоелектронні повторювачі та регенератори у тих випадках, коли немає необхідності в точному відновленні сигналу.

Підсилювачі потужності (бустери, Booster EDFA) встановлюються безпосередньо після лазерних передавачів та призначені для додаткового посилення сигналу до рівня, який не може бути досягнутий на основі лазера в обладнанні. Бустери можуть також встановлюватися перед оптичним розгалужувачем, наприклад, при передачі низхідного трафіку в гібридних волоконно-коаксіальних архітектурах кабельного телебачення.

Подвійний підсилювач (Dual EDFA) цей вид підсилювача комбінує функції бустера і препідсилювача. Зазвичай використовується для підвищення пропускну здатності в системах, де потрібна обробка кількох потоків даних або, коли необхідна резервна лінія.

Middle Stage Access (MSA) – EDFA серединного рівня доступу використовується в рішеннях OADM (Optical Add-Drop Multiplexer, мультиплектори вводу-виводу). Цей тип підсилювача дозволяє доступ до проміжної точки. EDFA серединного рівня доступу (Middle Stage Access EDFA Optical Amplifier) розміщується в середині оптоволоконної мережі між двома вузлами системи DWDM. Конструкція цієї моделі оптичного підсилювача дозволяє використовувати переваги DCM для підвищення гнучкості розгортання. Нові варіанти розміщення вимагають меншої кількості підсилювачів у лінії зв'язку і, тим самим, надають можливості реалізації рішень, які були б неможливі при використанні підсилювачів на базі застарілих технологій.

Single Fiber EDFA – одноволоконний оптичний підсилювач EDFA підтримує двосторонню передачу по одному волокну (з використанням циркуляторів). Одноволоконний оптичний підсилювач EDFA (Single Fiber EDFA Optical Amplifier) збільшує потужність оптичного сигналу безпосередньо всередині тієї ж оптоволоконної лінії, якою він передається. Зазвичай використовується в системах, де є лише одне волокно для передачі сигналу,

волоконна інфраструктура обмежена і немає можливості прокласти додаткові волокна для різних підсилювальних каналів.

Моделі одноволоконних EDFA працюють із конфігурацією, де червоний діапазон (1547–1561 нм) і синій діапазон (1528–1543 нм) розділяються через циркулятори та WDM-фільтри для двосторонньої передачі. Червоний діапазон використовується для одного напрямку (наприклад, downstream), а синій — для іншого (upstream), що дозволяє ефективно інтегрувати EDFA в одноволоконні DWDM-рішення.

На рис. 4.5. показано схеми встановлення EDFA-підсилювачів в оптичній лінії.

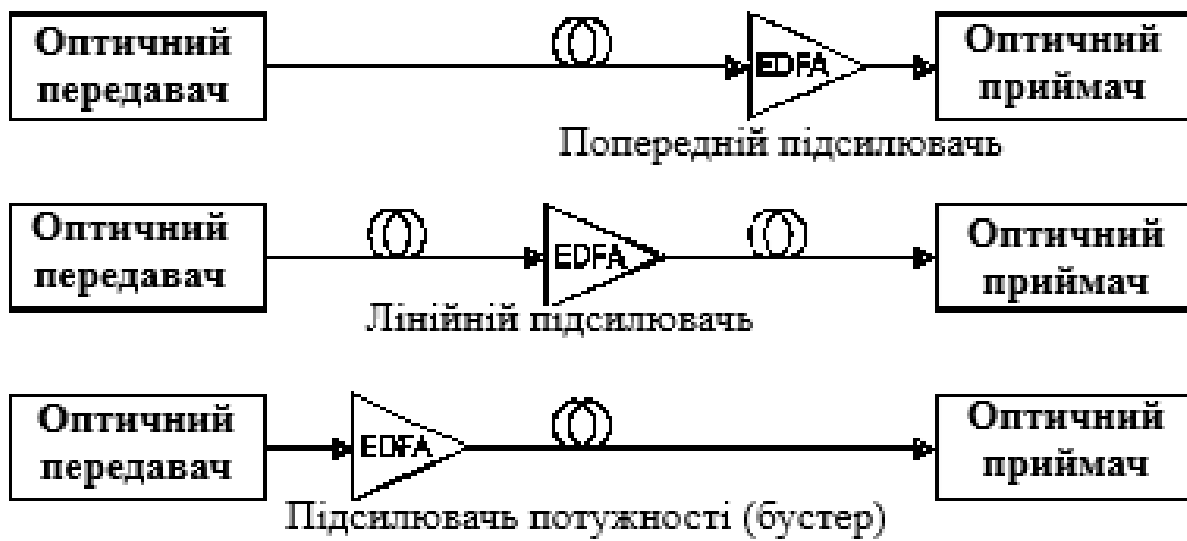


Рис. 4.5. Схема застосування.

Нижче наведено де-кілька варіантів оптичних підсилювачів EDFA, які виконанні у вигляді лінійних карт (плат) для встановлення в модульну систему DWDM шасійного виконання з можливістю установки в 19-дюймові телекомунікаційні шафи або стійки.



Рис. 4.6. Оптичний підсилювач EDFA компанії DWDM.ME.

Оптичний підсилювач EDFA компанії DWDM.ME (рис. 4.6.) збільшує потужність оптичного сигналу через волоконно-оптичний кабель, без необхідності перетворення в електричний сигнал. Модуль підсилювача може працювати при постійному посиленні (автоматичне регулювання підсилення AGC) та постійної вихідної потужності (автоматичне регулювання потужності APC). EDFA інтегруються в системи щільного мультиплексування хвильового поділу DWDM, що дозволяє збільшити пропускну здатність каналу зв'язку. Вбудований змінний оптичний атенюатор (Variable Optical Attenuator, VOA) може бути автоматично налаштований для забезпечення плавного посилення сигналу. Здійснює загальне посилення оптичного сигналу С-діапазону. Має три основні застосування: збільшення потужності (BA), лінійне посилення (LA) та функції попереднього посилення (PA).

Подвійний оптичний підсилювач EDFA.



Рис. 4.7. Подвійний оптичний підсилювач EDFA компанії DWDM.ME.

Подвійний оптичний підсилювач EDFA (Dual EDFA Optical Amplifier) компанії DWDM.ME (рис. 4.7.) має два незалежні підсилювальні канали, що дозволяє збільшити пропускну здатність оптичної системи за рахунок паралельної обробки обох сигналів. Модуль оптичного підсилювача EDFA забезпечує багатфункціональні рішення із низьким рівнем шуму волоконно-оптичного підсилювача. Модуль підсилювача може працювати при постійному коефіцієнті посилення (автоматичне регулювання підсилення AGC) та постійної вихідної потужності (автоматичне регулювання потужності APC). Це високоінтегрований EDFA, модуль якого підтримує подвійний підсилювач із двома незалежними блоками підсилення. Здійснює загальне посилення оптичного сигналу С-діапазону та має три основні застосування: збільшення потужності (BA), лінійне посилення (LA) та функції попереднього посилення (PA).

4.4. Раманівські підсилювачі

Раманівські підсилювачі базуються на ефекті Рамана – нелінійному оптичному явищі, що виникає при взаємодії світла з молекулами матеріалу. Ефект Рамана був відкритий індійським фізиком Чандрасекхарою Венкатою Раманом (рис. 4.8.) у 1928 році. Під час експериментів він виявив, що невелика частка світла, проходячи крізь прозорий матеріал, розсіюється й може змінювати свою довжину хвилі внаслідок енергетичної взаємодії з молекулами матеріалу. Це явище зараз відомо як ефект Рамана. У 1970-х роках дослідники почали експериментувати з реалізацією цього ефекту всередині оптичного волокна – коли потужне світло («накачка») передається паралельно із слабшим сигналом. У результаті енергія частини фотонів передається сигналу, що дозволяє його підсилити. До 1990-х років раманівські підсилювачі стали активно використовуватись у телекомунікаційних мережах – особливо для магістральних ліній зв'язку на великі відстані, де важливе розподілене підсилення уздовж волокна.

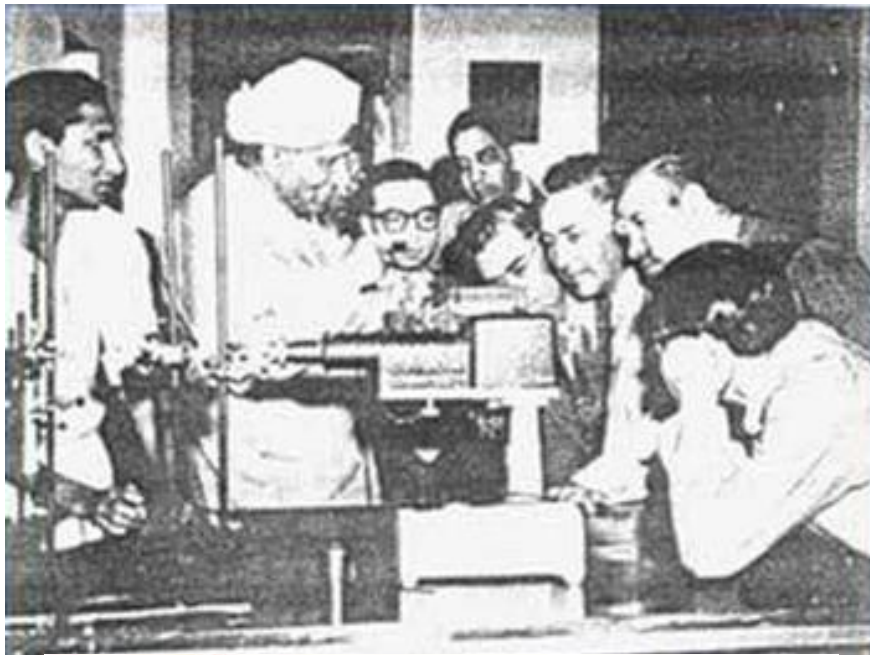


Рис. 4.8. Індійський фізик Раман та його голографічний ріжковий фільтр 785 нм для рамановської спектроскопії.

Раманівські підсилювачі волокна можуть бути сконфігуровані для розподіленого або точкового (локалізованого) підсилення, залежно від архітектури мережі, що забезпечує гнучкість мережі та адаптацію до конкретних вимог. Розподілений раманівський підсилювач (DRA) – це ключова технологія для сучасних оптичних мереж, особливо тих, які використовують когерентну передачу. У системах DRA часто застосовують модулі Раман-насосів у контрнаправленій конфігурації (рис. 4.9.), тобто насосне світло рухається назустріч сигналу, що дозволяє рівномірніше розподілити підсилення уздовж волокна. DRA також використовується в комбінації з ербієвими підсилювачами волокна (EDFA), виконує функцію попереднього (pre-amplifier) або розподіленого підсилювача, який доповнює EDFA в магістральних

системах. У багатьох випадках ці компоненти об'єднуються в гібридні модулі Raman/EDFA. Гібридні модулі Raman/EDFA дозволяють оптимізувати енергоспоживання, розширити спектр підсилюваних каналів та знизити загальні витрати на інфраструктуру, спрощуючи управління у реальному часі.

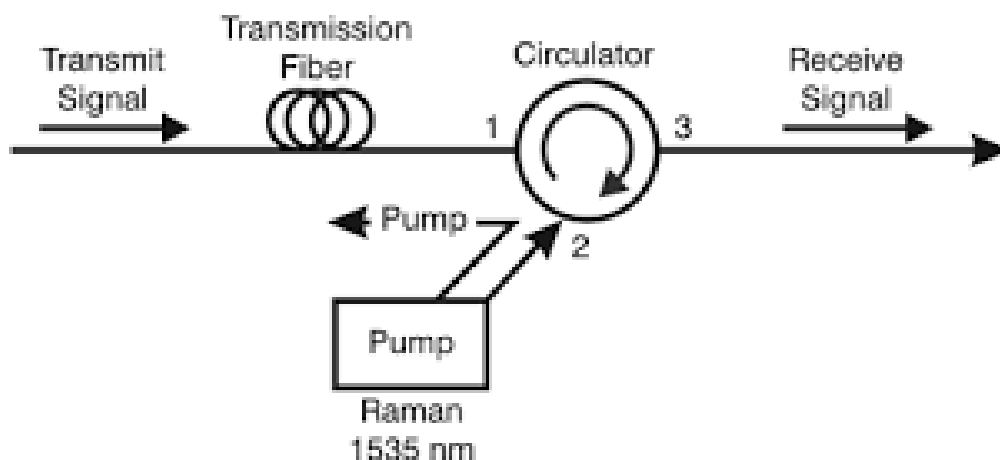


Рис. 4.9. Принципова схема роботи Раманівського підсилювача.

Переваги DRA:

- Підсилення сигналу вздовж передачі волокон.
- Низькі шумові характеристики та покращений оптичний сигнал відносно шуму OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio).
- Широкий діапазон підсилення, що досягається завдяки використанню декількох насосів на різних довжинах хвиль.

Недоліки DRA:

- Висока потужність насосного випромінювання.
- Нелінійні ефекти, які можуть знижувати ефективність системи.
- Вимоги до довгого волокна і, часто, переобладнання існуючих ліній, що може бути складним або затратним у старих мережах.

На рис. 4.10. показаний розподілений раманівський підсилювач (DRA) компанії DWDM.ME.





Рис. 4.10. Розподілений раманівський підсилювач (DRA) компанії DWDM.ME.

Для мінімізації недоліків DRA були розроблені комбіновані раманівські підсилювачі (LRA), які включають дисперсійне компенсувальне волокно (dispersion compensating fiber, DCF) – обмежене Raman-підсилення з додатковою компенсацією дисперсії. Ця технологія стала популярною в магістральних системах передачі із мультиплексуванням по довжині хвилі (WDM).

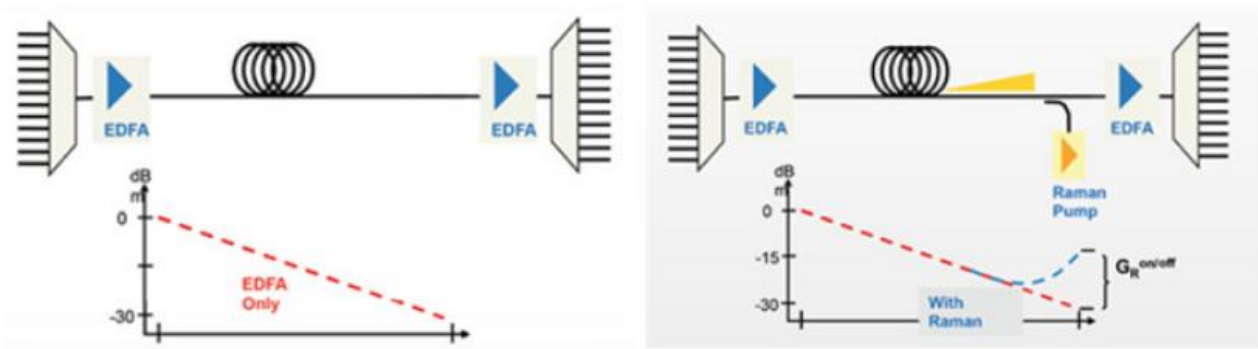
Основна перевага LRA – це висока негативна дисперсія, що компенсує хроматичну та нелінійну дисперсію, за рахунок високої концентрації GeO_2 (діоксид германію, або Germanium dioxide) у DCF волокні (германій підвищує нелінійність і ефективність Raman-розсіяння).

Діоксид германію має низку цікавих властивостей і застосувань, особливо в оптичних технологіях – його додають до кварцового скла (SiO_2), щоб підвищити показник заломлення – це дозволяє формувати серцевину волокна з бажаними оптичними властивостями.

До недоліків LRA слід віднести підвищену чутливість до нелінійностей (висока Raman-ефективність у DCF може стимулювати небажані ефекти, якщо не оптимізовано потужність накачки) та складність інтеграції (DCF має інші геометричні параметри й може створювати труднощі при зварюванні чи гнучкому трасуванні).

Загалом, LRA з DCF – це інженерний компроміс, який підходить для магістральних систем, де потрібне одночасне підсилення і дисперсійна компенсація та немає можливості або економічної доцільності переходу на повністю когерентну систему з цифровою компенсацією.

На рис. 4.11. показані переваги використання комбінованих раманівських підсилювачей (LRA).



Signal power vs. distance with EDFA only

Signal power vs. distance with EDFA and Raman amplifier

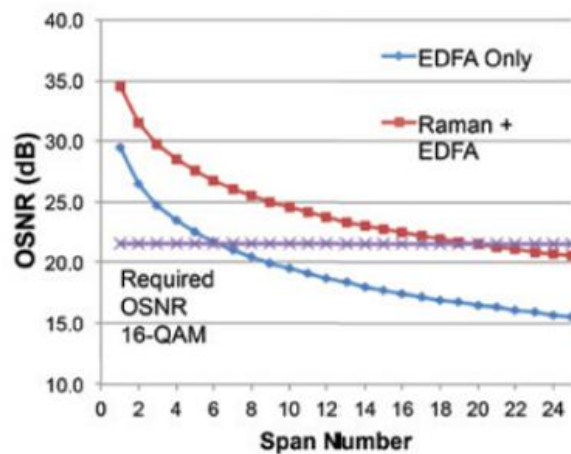
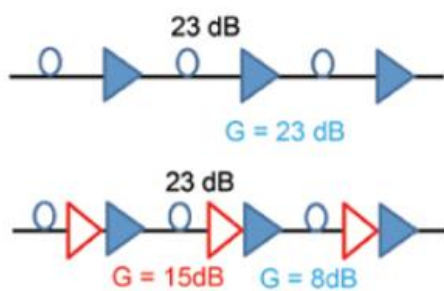


Рис. 4.11. Переваги використання комбінованих раманівських підсилювачей (LRA).

Раманівські підсилювачі волокна (RFA) відіграють ключову роль у розвитку сучасних волоконно-оптичних мереж, вирішуючи важливі питання, такі як оптично посилені відстані середнього прольоту та розширення смуги пропускання. Однією з головних переваг RFA є їхня здатність інтегруватися з передавальними волокнами, а також працювати на будь-якій довжині хвилі, забезпечуючи широкий спектр підсилення та рівномірність коефіцієнта підсилення через комбінацію різних джерел випромінювання. Завдяки низці технічних досягнень RFA стали вирішальним елементом для передачі оптичних сигналів у магістральних мережах.

На рис. 4.12. показано використання раманівських підсилювачів замість звичайних підсилювачів та регенераційного (відновлювального) пункту та обладнання Siena 6500, що значно спростило та здешевщило схему. Регенераційний (відновлювальний) пункт – це як правило два полукомплекти обладнання, один з яких приймає оптичний сигнал, перетворює його на електричний, з корекцією всіх помилок, а потім знову перетворює його на

оптичний та передає в лінію. Відповідно додатковий комплект буде коштувати дорожче ніж використання підсилювача.

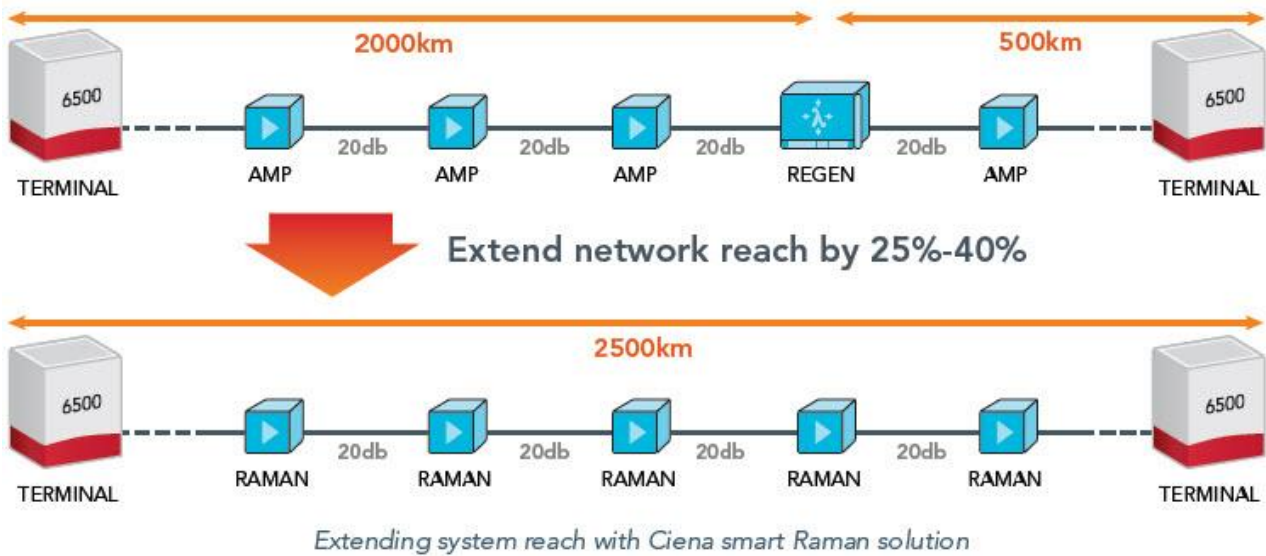


Рис. 4.12. Використання раманівських підсилювачів замість звичайних підсилювачів та регенераційного пункту та обладнання Ciena 6500.

При виборі RFA важливо враховувати коефіцієнт посилення «on-off Raman» - виграш, отриманий внаслідок Раманівські посилення порівняно з іншими технологіями. On-off Raman gain – це різниця рівня сигналу з активним Raman-підсилювачем ("on") порівняно з рівнем сигналу без накачування ("off"). Іншими словами, це виграш в потужності сигналу, який забезпечується внаслідок Raman-посилення. Вимірюється у децибелах (дБ). Типові значення наведені в таблиці 4.4.

Табл. 4.4. Типові значення On-Off Gain.

Тип накачування	On-Off Gain (типове)
Прямонаправлена накачка (Forward pumping)	6–10 дБ
Зустрічна накачка (Backward pumping)	8–14 дБ
Двостороння накачка (Dual pumping)	До ~20 дБ
<i>Залежить від довжини волокна, потужності накачки та типу волокна (звичайне чи DCF).</i>	

В таблиці 4.5. показано ключові відмінності між раманівським підсилювачем (RFA) та ербієвим підсилювачем (EDFA) за кількома параметрами. Це дозволяє краще зрозуміти, в яких випадках кожен тип підсилювача є більш доречним.

Таблиця 4.5. Ключові відмінності між раманівським підсилювачем (RFA) та ербієвим підсилювачем (EDFA).

Параметр	RFA (Raman)	EDFA
On-Off Gain (Виграш у потужності сигналу при увімкненому підсилювачі порівняно з вимкненим. Показник ефективності підсилення)	Від ~10 дБ	Від ~20–30 дБ
OSNR (Якість підсиленого сигналу відносно фонових шумів. Вищий OSNR означає кращу якість передачі)	Високий	Середній
Довжина хвилі підсилення (Спектральний діапазон, в якому підсилювач ефективно працює)	Гнучка	Обмежена (C/L діапазони)
Локалізація підсилення (Вказує, де саме відбувається підсилення: у точці (EDFA) чи уздовж всього волокна (RFA))	Уздовж волокна	Точкова

Загальне порівняння типів оптичних підсилювачів наведено в табл. 4.6.

Табл. 4.6. Порівняння типів оптичних підсилювачів.

Параметр	EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier)	DRA (Distributed Raman Amplifier)	LRA (Raman + DCF)
Тип підсилення	Локалізоване	Розподілене уздовж волокна	Гібридне: DRA + DCF
Механізм	Збудження іонів ербію	Raman-ефект у середовищі	Raman-ефект у DCF-волокні
Довжини хвиль накачування	980 / 1480 нм	Визначаються довжинами сигналу	Спектр у межах DCF
Область підсилення	1530–1565 нм	Гнучке налаштування спектра	Обмежене спектром DCF

OSNR	Високий	Найвищий	Погіршується на високих рівнях посилення
Інфраструктурні вимоги	Просте впровадження	Довгі волокна, насоси	DCF, складність інтеграції
Потужність накачування	Помірна	Висока	Помірна / висока
Нелінійні ефекти	Низькі	Можливі при високих потужностях	Підвищені через германій
Компенсація дисперсії	Ні	Частково	Так (негативна CD)
Гнучкість в конфігурації	Обмежена	Висока	Обмежена через DCF
Застосування	Міжвузлові підсилювачі	Магістралі, когерентні системи	Магістралі WDM з компенсацією дисперсії

Як висновок можна навести таке:

- EDFA – простий, надійний і масово використовуваний.
- DRA – ідеальний для сучасних когерентних систем із довгими трасами.
- LRA – проміжне рішення для WDM-магістралей, де потрібна компенсація дисперсії без цифрової обробки.

4.5. Компенсатори дисперсії

Компенсатори дисперсії відіграють ключову роль у DWDM-системах, забезпечуючи корекцію хроматичної дисперсії, яка виникає під час передачі оптичного сигналу. Хроматична дисперсія спричиняє розширення імпульсів світла, що може призвести до погіршення якості сигналу та збільшення помилок у передачі даних. Для її компенсації використовуються спеціальні оптичні пристрої, які коригують зміни швидкості поширення різних довжин хвиль у волокні.

Існує кілька типів компенсаторів дисперсії, серед яких дисперсійно-компенсуючі волокна (DCF) та дисперсійні компенсатори на основі фазових модуляторів.

DCF – це спеціальні оптичні волокна з негативною дисперсією, які додаються до лінії зв'язку для нейтралізації ефекту хроматичної дисперсії. Фазові компенсатори, у свою чергу, використовують активні оптичні компоненти для корекції сигналу в реальному часі.

Компенсатори дисперсії особливо важливі для довгих магістральних DWDM-мереж, де сигнали передаються на великі відстані. Без ефективної компенсації дисперсії якість сигналу значно погіршується, що обмежує максимальну довжину оптичного каналу. Використання компенсаторів дозволяє підтримувати високу швидкість передачі даних та мінімізувати втрати сигналу.

Окрім хроматичної дисперсії, у DWDM-системах також враховується поляризаційно-модова дисперсія (PMD), яка виникає через неоднорідності у волокні. Для її компенсації застосовуються спеціальні адаптивні компенсатори, які коригують зміни поляризації сигналу. Це особливо важливо для високошвидкісних систем, де PMD може суттєво впливати на якість передачі даних.

На рисунку 4.13. показано схема хроматичної та поляризаційної дисперсії з показом, як компенсатори “вирівнюють” імпульс.

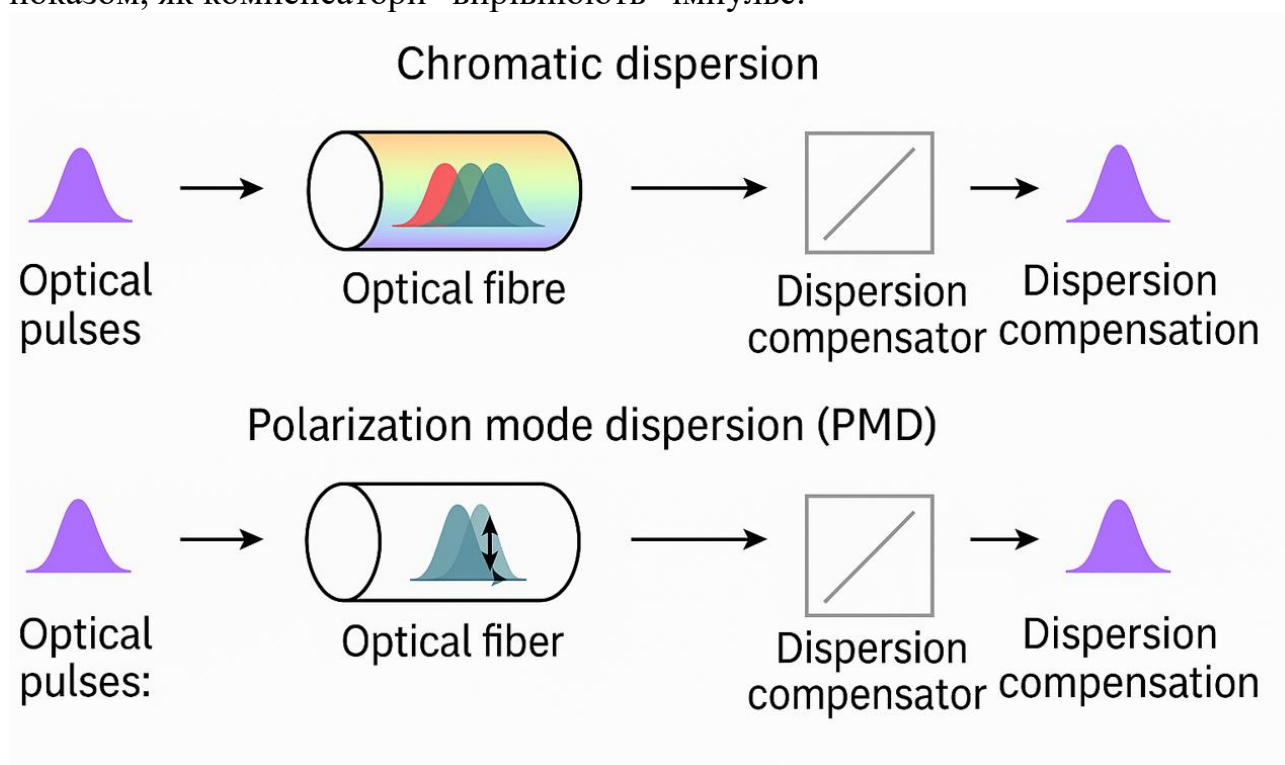


Рис. 4.13. Схема хроматичної та поляризаційної дисперсії з показом, як компенсатори “вирівнюють” імпульс.

Загалом, використання компенсаторів дисперсії є критично важливим для забезпечення стабільної роботи DWDM-мереж. Вони дозволяють підтримувати високу пропускну здатність, зменшувати вплив інтерференції між каналами та забезпечувати надійність передачі даних на великих відстанях. Компенсатори різних типів виконання показані на рис. 4.14. та 4.15.



Рис. 4.14. Компенсатор дисперсії Avanex 100SMF.



Рис. 4.15. Компенсатор дисперсії рекового виконання для 19-дюймових шаф.

4.6. PON - як різновид технології FTTx

Стрімкий розвиток технологій, лавінообразне зростання трафіку призвели до того, що звичайного мідного кабелю вже не вистачає для передачі тої кількості трафіку, яка необхідна абоненту (це не зовсім вірно за своєю суттю твердження, але його сенс полягає в тому, що збільшилась в рази кількість трафіку, якому необхідна широка пропускна здатність). І завдячувати треба великій кількості мультимедійних сервісів - онлайн відео, музика, ігри тощо. Волоконно-оптичний кабель у порівнянні з мідним може забезпечити значно більшу пропускну здатність. І на більші відстані.

Інтернет-сервіс провайдери (ІСП або ISP, Internet Service Provider), які надають послуги доступу до мережі Інтернет, вже розгорнули оптичні мережі до точки x (Fibre-To-The-x, FTTx).

Концепція технології FTTx полягає в тому, що літера x в кінці аббревіатури пояснює те чи інше технологічне рішення, а саме:

- волокно до квартири (Fiber to the Home, FTTH),

- волокно до мікрорайону (Fiber to the Curb, FTTC),
- волокно до будинку (Fiber to the Building, FTTB),
- волокно до мережевого вузла (Fiber to the Node, FTTN).

Суть технології FTTx полягає в організації оптичного підключення в безпосередній близькості від приміщень кінцевого користувача (рис. 4.16).

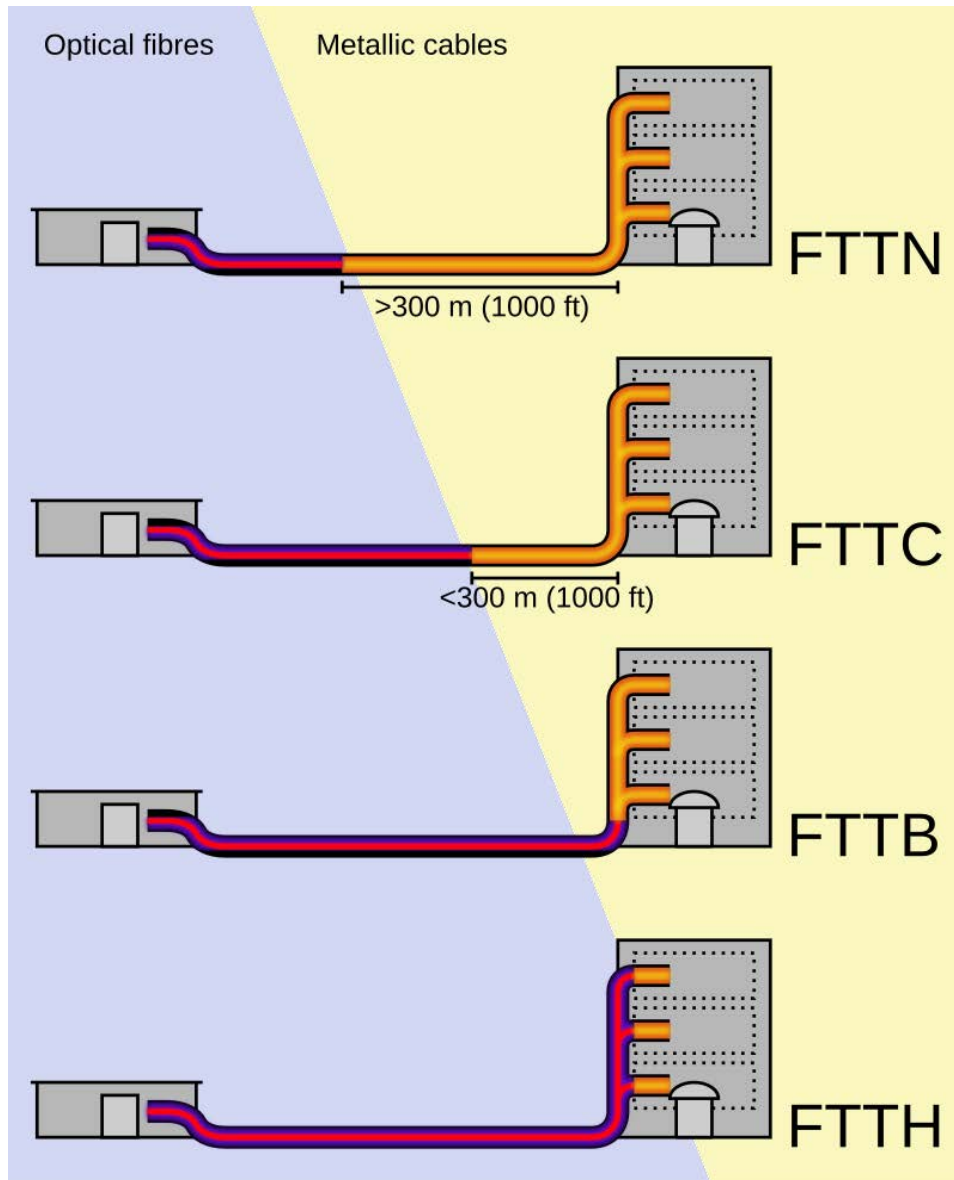


Рис. 4.16. Архітектура технології FTTx

Розвиток технологій FTTx є ключовим фактором еволюції телекомунікаційних мереж, що дозволяє забезпечити високошвидкісний доступ до Інтернету, підвищену стабільність з'єднання та можливість інтеграції нових сервісів. Більш детально розглянемо як працюють основні варіанти технології FTTx. Також відмітим їх переваги та недоліки і окремо приділимо увагу перспективам їх майбутнього розвитку.

Fiber to the Node (FTTN)

FTTN (Fiber to the Node) – це технологія, при якій оптоволоконний кабель прокладається до вузла (Node), розташованого поблизу абонентів (зазвичай у межах 1-2 км), а далі до кінцевого користувача використовуються існуючі мідні або коаксіальні лінії (наприклад, DSL або кабельний модем). Це дозволяє підвищити швидкість інтернету порівняно з повністю мідними мережами, але обмежує пропускну здатність і дальність через мідну частину. FTTN є проміжним рішенням перед FTTH (Fiber to the Home), часто використовується для економії витрат на модернізацію інфраструктури.

Fiber to the Home (FTTH)

Цей варіант технології передбачає прокладання оптичного волокна безпосередньо до квартири чи будинку абонента. Вузлова оптична станція, або як її ще називають головна станція (Optical Line Terminal, OLT), з'єднується з користувацьким пристроєм через оптичний термінал (ONT - Optical Network Terminal або ONU - Optical Network Unit), який перетворює оптичний сигнал у електричний для підключення кінцевого обладнання.

Топологічно PON має вигляд дерева, але можливі й інші варіанти побудови мережі (наприклад, шина або зірка). Основними пасивними елементами PON (окрім оптичного волокна) є сплітери (розгалужувачі).

Переваги:

- Максимальна швидкість передачі даних (до 10 Гбіт/с і більше з використанням XGS-PON).

- Стабільність зв'язку без впливу електромагнітних перешкод.

- Мінімальні затримки в передачі даних, що критично для онлайн-ігор, стрімінгу та VoIP.

- Недоліки:

- Відносно висока вартість прокладки оптичного кабелю на останньому етапі до користувача.

- Необхідність спеціального обладнання для кінцевого абонента.

Fiber to the Building (FTTB)

У варіанті FTTB волокно підводиться до будівлі, а далі розподіляється через внутрішню мідну мережу (Ethernet або VDSL). VDSL (Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line) - це технологія широкопasmового доступу до Інтернету, яка використовує мідні телефонні лінії для передачі даних на високих швидкостях. Вона є покращеною версією xDSL, зокрема ADSL, і забезпечує значно швидше з'єднання завдяки використанню більш широкого діапазону частот. xDSL - це загальна назва для сімейства технологій цифрових абонентських ліній (Digital Subscriber Line), які використовують мідні телефонні кабелі для високошвидкісного доступу до Інтернету. Символ «x» означає різні варіанти DSL, такі як ADSL, VDSL, SDSL та інші.

Ці технології дозволяють передавати дані на значно вищих швидкостях, ніж традиційні аналогові модеми, і підтримують одночасну передачу голосу та даних. Вони працюють на існуючих телефонних лініях, не заважаючи роботі телефонів або факсів.

VDSL може підтримувати швидкість завантаження до 100 Мбіт/с і швидкість вивантаження до 50 Мбіт/с, але реальна швидкість залежить від відстані до обладнання провайдера та якості телефонних ліній. На сьогоднішній день технологія xDSL в Україні майже не використовується, хоча одного часу була дуже розповсюджена, але на відміну від її «традиційного призначення» в якості абонентського доступу на мережах українських операторів її зазвичай використовували для міжстанційних з'єднань. Найбільшого розповсюдження на той час мали xDSL-модеми сімейства WATSON швейцарського виробника Schmid Telecom AG та модеми Callisto словенського виробника Iskratel.

Переваги:

- Зниження витрат у порівнянні з FTTH
- Високошвидкісний інтернет для мешканців будівлі
- Гнучкість в інтеграції з існуючими мережами

Недоліки:

- Обмеження швидкості через використання мідної кабельної мережі
- Залежність від якості внутрішньої інфраструктури будівлі

Fiber to the Curb (FTTC)

FTTC – це модель, в якій оптичне волокно доходить до вуличного вузла, а від нього до абонента сигнал передається через мідні або коаксіальні кабелі.

Переваги:

- Доступність та економічність у порівнянні з FTTH
- Швидший процес розгортання
- Можливість модернізації до FTTH у майбутньому

Недоліки:

- Обмеження швидкості через мідні або коаксіальні кабелі
- Чутливість до електромагнітних перешкод

Сучасні оптичні мережі доступу до абонентів базуються на технологіях GPON (Gigabit Passive Optical Network), 10G-PON (10Gigabit Passive Optical Network) або XGS-PON (10-Gigabit Symmetrical Passive Optical Network), що забезпечують симетричну швидкість до 10 Гбіт/с. Технології - 10G-PON та NG-PON2 - забезпечують ще більшу пропускну здатність та підтримку сучасних додатків, включаючи хмарні обчислення, 8K-стрімінг та розширену реальність (AR/VR).

Хоча як такий PON починався з EPON (Ethernet PON), або GEPON (Gigabit Ethernet PON). Цю технологію було стандартизовано 24 червня 2004 року документом IEEE 802.3ah-2004.

На рис. 4.17. показана принципова схема побудови мережі PON.

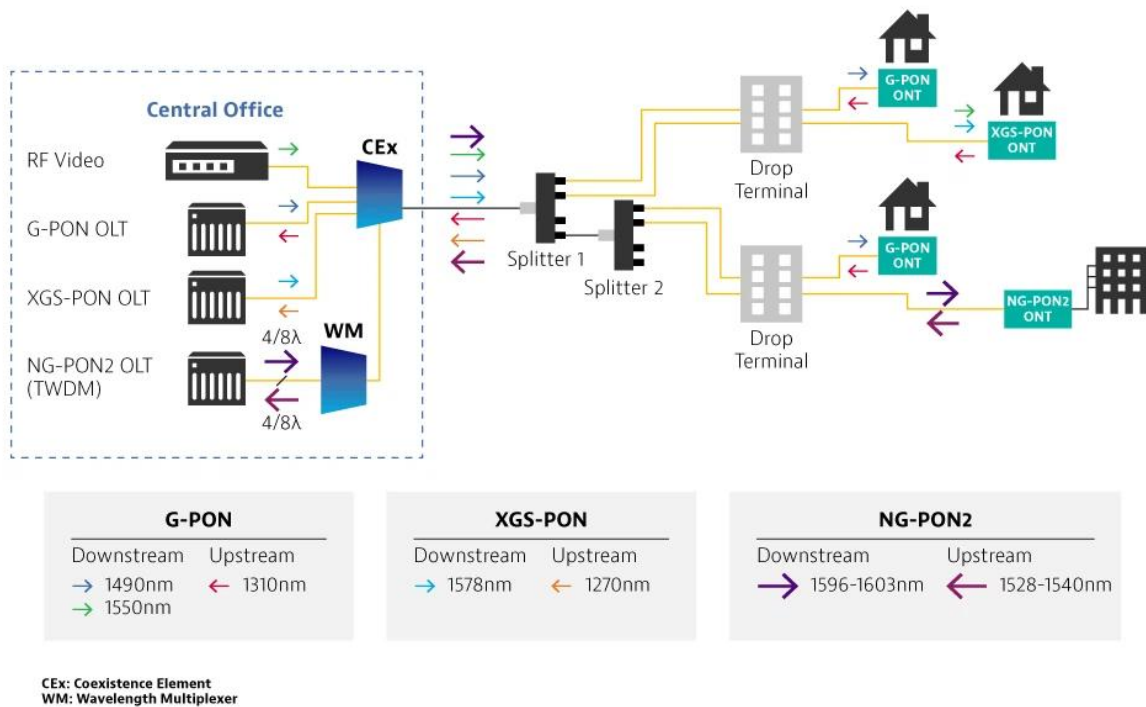


Рис. 4.17. Принципова схема побудови мережі PON.

Як і в інших технологіях пасивних оптичних мереж, в GEPON використовується деревоподібна топологія (Point To Multipoint, P2MP) волоконно-кабельної системи з пасивним оптичним розгалуженням на оптичних сплітерах, а робота системи здійснюється по одному волокну за принципом WDM.

Технологія GEPON дає можливість застосовувати одну головну станцію (Optical Line Terminal, OLT), а на кожному PON-порту може бути підключено 64-и абонентські пристрої (Optical Network Unit, ONU). Схема наведена на рис. 4.18. Довжина PON гілки обмежується оптичним бюджетом (про розрахунок оптичного бюджету розказувалось у розділі 2.5.) і залежить від потужності оптичних передавачів, довжини волоконно-оптичної лінії та кількості оптичних сплітерів на ній. Низхідний потік даних (від головної станції до абонентів) транслюється на довжині хвилі 1490 нм зі швидкістю 2,5 Гбіт/с, а висхідні потоки (від усіх абонентів до головної станції) подаються на довжині хвилі 1310 нм із загальною швидкістю 1,25 Гбіт/с. Пакети від різних абонентських пристроїв передаються в різні інтервали часу, для чого використовується метод TDMA (Time Division Multiple Access) - технологія множинного доступу з поділом часу.

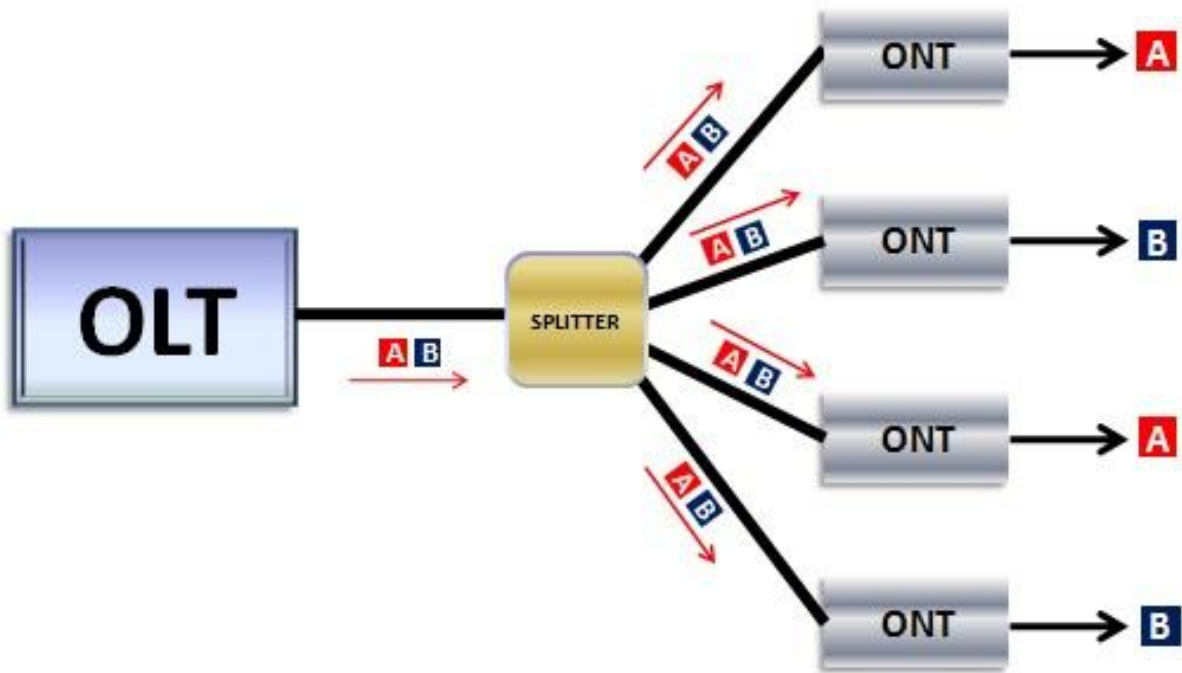


Рис. 4.18. Метод TDMA для зв'язку OLT та ONU.

Довжину хвилі 1550 нм зарезервовано для надання необов'язкових послуг, зазвичай трансляції відео/телебачення. Але у більшості провайдерів пакет послуг включає + TV.

Зазвичай відстань від OLT до ONU складає 20 км і, як зазначалось вище, на один порт головної станції може бути підключено 64 абонентські пристрої. В де-яких випадках, відстань може бути зменшена до 10 км, а кількість абонентів на одному порту головної станції може бути збільшена до 128, але це залежить від використовуваного обладнання і є скоріше виключенням ніж правилом.

На рис. 4.19. показана 2-юнітова головна станція LT7310X-32 XG(S) PON 2U 10G OLT виробництва компанії DWDM.ME.



Рис. 4.19. 2-юнітова головна станція LT7310X-32 XG(S) PON 2U 10G OLT виробництва компанії DWDM.ME

Технічні характеристики обладнання LT7310X-32 XG(S) PON 2U 10G OLT:

- Повна відповідність міжнародним стандартам ITU-T G.984/G.987/G.988/G.9807 гарантує безпроблемну інтеграцію з різними мережевими рішеннями.
- Має дубльовані контролери та блоки живлення, які разом із захищеною оптоволоконною магістраллю забезпечують високу надійність та безперебійну роботу оптичної системи.
- Розширені функції комутації другого та третього рівнів, а також гнучке керування оптимізують мережеву інфраструктуру.
- Вбудовані механізми QoS значно покращують якість обслуговування користувачів навіть при значних навантаженнях.

На рис. 4.20. показана 1-юнітова головна станція LT6320X XG(S)-PON Combo OLT виробництва компанії DWDM.ME.



Рис. 4.20. 1-юнітова головна станція LT6320X XG(S)-PON Combo OLT виробництва компанії DWDM.ME

Технічні характеристики обладнання LT6320X XG(S)-PON Combo OLT:

- Відповідність міжнародним стандартам ITU-T G.984/987/G.988 забезпечує надійну інтеграцію з різними мережевими рішеннями.
- Підтримує три режими роботи порту PON: GPON, XGPON і XGSPON для гнучкості і масштабованості.
- Має розширені функції комутації рівня 2/3 і гнучкі методи управління, які покращують налаштування та експлуатацію.
- Має резервування посилок з підтримкою протоколів FlexLink, STP, RSTP, MSTP, ERPS і LACP, що забезпечує надійність мережі.

На рис. 4.21. показан абонентський пристрій ONU з підтримкою WiFi виробництва компанії DWDM.ME модель XGPON XGPWF-6.



Рис. 4.21. Абонентський пристрій ONU з підтримкою WiFi виробництва компанії DWDM.ME модель XGPON XGPWF-6.

Технічні характеристики обладнання XGPON XGPWF-6:

- Розширені функції обробки даних: управління VLAN-тегами, класифікація потоків і фільтрація пакетів для підвищення ефективності і гнучкості мережевого управління.
- Ефективне управління мережевим трафіком: підтримка NAT/NAPT і переадресації портів оптимізує розподіл мережевих ресурсів і підвищує продуктивність мережі.
- Підтримка декількох типів високошвидкісного доступу: включає оптоволоконний, DSL і кабельний доступ для гнучкості в підключенні.
- Високошвидкісна передача даних: забезпечує швидку передачу даних для пакетів різних розмірів, що підвищує загальну продуктивність мережі.

На рис. 4.22. показан абонентський пристрій ONU (з підтримкою WiFi) виробництва компанії DWDM.ME модель XGPON XGP-1+2.5.



Рис. 4.22. Абонентський пристрій ONU (з підтримкою WiFi) виробництва компанії DWDM.ME модель XGPON XGP-1+2.5.

Технічні характеристики обладнання XGPON XGP-1+2.5:

- Масштабованість і можливість підключення: 15 TCONT і 256 портів GEM забезпечують широкі можливості для масштабування і підключення різних пристроїв.
- Гнучкість управління мережевими потоками: підтримка режиму спільного розміщення VLAN/priority/VEIP gem дозволяє точно налаштувати та керувати мережевими потоками.
- Ефективне управління мережовим трафіком: підтримка NAT/NAPT і переадресації портів оптимізує розподіл мережових ресурсів і підвищує продуктивність мережі.
- Повишена надійність і безпека: функція «Dying gasp» (сигнал аварійного виключення) забезпечує додатковий захист мережі у разі критичних ситуацій.

Перспективи розвитку FTTx

Перехід на нове покоління PON-технологій, включаючи 50G-PON, дозволить значно розширити можливості телекомунікаційних мереж та забезпечити високошвидкісне підключення навіть у найвіддаленіших регіонах. Інтеграція оптичних мереж з 5G сприятиме розвитку концепції Smart City, автоматизованих систем управління та Інтернету речей (IoT).

На весні 2025 р. Huawei спільно з оператором China Unicom запустили першу в країні ширококутну мережу стандарту 10G у районі Сюн'ань провінції Хебей. Цей регіон розташований поблизу Пекіна і розглядається як один із ключових технологічних хабів Китаю. Мережа побудована на базі першого у світі рішення 50G PON, що дає змогу збільшити пропускну спроможність одного користувача зі звичного рівня 1 Гбіт/с до 10 Гбіт/с на секунду. Також значно знижено затримку до ≤ 3 мс. Згідно з опублікованими даними, реальна швидкість завантаження в мережі досягла 9834 Мбіт/с, а швидкість відправки - 1008 Мбіт/с. Це істотно перевершує поточні стандарти домашнього ширококутвого доступу і відкриває нові можливості для використання технологій з високим навантаженням: 8K-відео, хмарні сервіси, віртуальна і доповнена реальність.

З огляду на стрімке зростання попиту на високошвидкісний інтернет, подальший розвиток оптичних технологій стане невід'ємною складовою цифрової трансформації суспільства. І хоча впровадження FTTH поки що залишається найкращим рішенням у довгостроковій перспективі, комбіновані моделі, такі як FTTB та FTTC, будуть використовуватись як компроміс між вартістю та якістю зв'язку. Таким чином, еволюція FTTx відкриває нові можливості для вдосконалення інфраструктури зв'язку та створення інноваційних цифрових сервісів.

Особливо добре технологія PON зарекомендувала себе під час «блек-аутів» - вимкень електроенергії - після початку повномасштабного вторгнення в Україну. Використання цієї технології провайдерами дозволяє абонентам

залишатись з доступом до мережі Інтернет. Єдине що треба зробити - це встановити дома невелике джерело безперебійного живлення (ДБЖ), від якого заживити домашній WiFi-роутер та ONU.

Загалнодоступна карта підключення до мережі Інтернет в Україні під час знеструмлень (інформація взята з сайту компанії Lun - <https://lun.ua>) показана на рис. 4.23. та пояснення до неї на рис. 4.24.

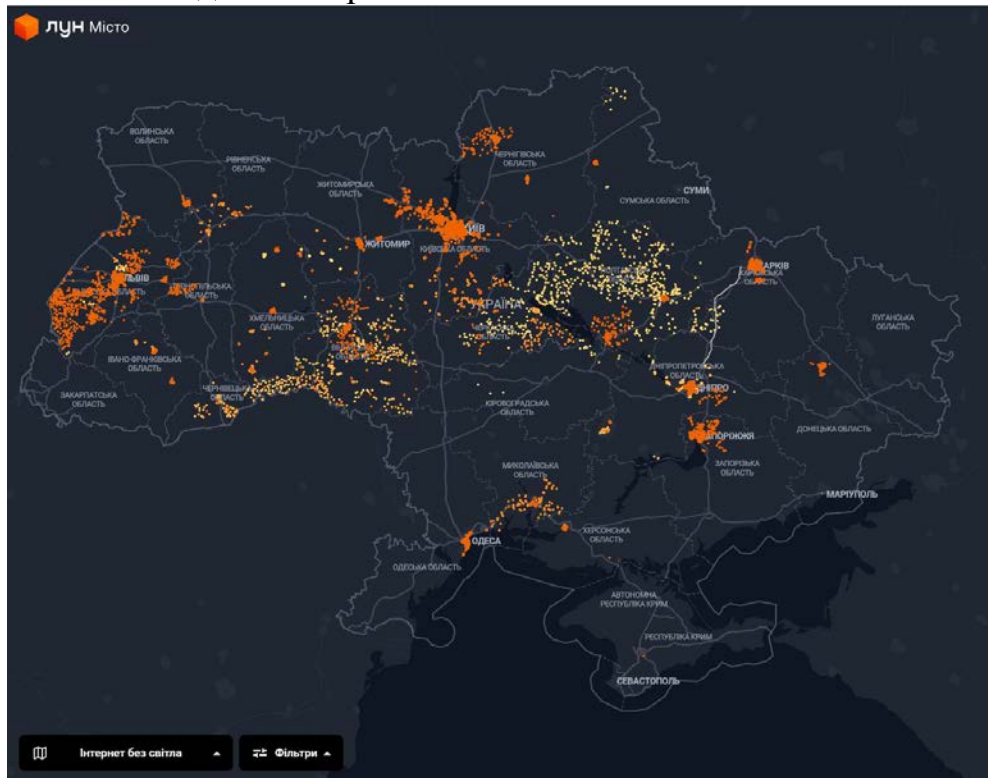


Рис. 4.23. Мапа підключення до мережі Інтернет в Україні під час знеструмлень.

Види технологій

Інтернет-провайдері готуються до можливих знеструмлень. Щоб українці могли спілкуватися, працювати та вчитися онлайн, попри плани ворога. Для цього впроваджують різні технології.

Розповідаємо про кожну, щоб ви могли вибрати найбільш оптимальну.

- **xPON** – енергоощадна технологія, що потребує в десятки разів менше витрат на підтримку інтернет-мереж у випадку знеструмлень. інтернет до 72 год
- **FTTx** – найбільш поширена технологія інтернет-доступу, що потребує живлення від акумуляторів та генераторів. інтернет 4-8 год, рідше – до 72 год
- **DOCSIS** – технологія, що передає інтернет через телевізійний кабель. інтернет 4-8 год, рідше – до 72 год
- **xDSL** – технологія, що передає інтернет через телефонні кабелі. інтернет 4-8 год, рідше - до 24 год

Що означають позначки на мапі?

- 📶 інтернет під час знеструмлень працює близько 4 годин
- 📶 8 годин
- 📶 12 годин
- 📶 24 години
- 📶 72 години

Ви провайдер?

І теж забезпечуєте стабільний інтернет навіть під час знеструмлень?
Тоді пишть на misto@lun.ua і ми додамо вас на Мапу.
Тема листа Стійкий Київ

Рис. 4.24. Пояснення до мапи підключення до мережі Інтернет в Україні під час знеструмлень.

Динаміка впровадження доступу до мережі Інтернет по технології xPON в Україні по областях (рис. 4.25.) станом на 28 листопада 2024 року показана на рисунку XX (інформація взята з сайту <https://osvitoria.media>).

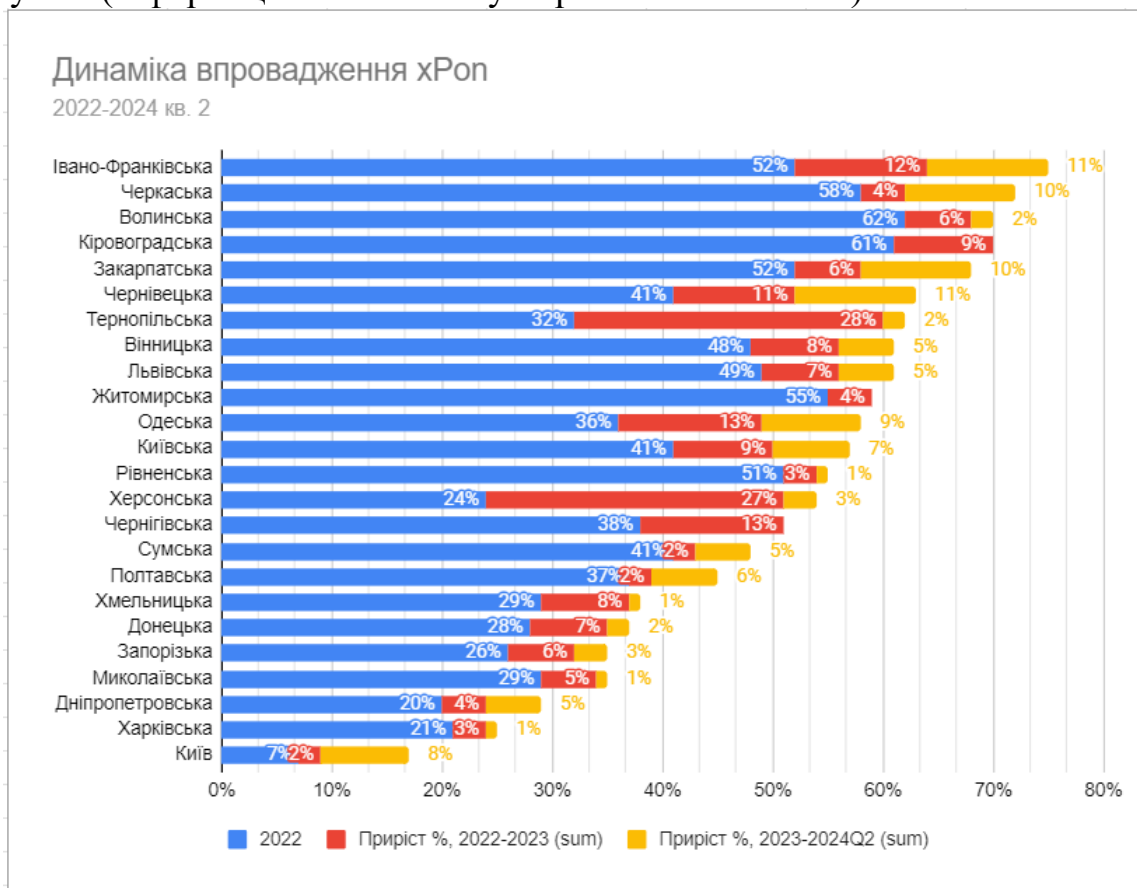


Рис. 4.25. Динаміка впровадження xPON в Україні по областях станом на 28 листопада 2024 року.

В Києві доступ до xPON мають 172 тисячі абонентів. У 2023 році ця кількість була 72 тисячі. На разі Київ має найнижчі показники впровадження xPON в Україні (інформація взята з сайту <https://osvitoria.media>).

Використана література для написання розділу [2, 6, 20, 24, 27, 29, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 45, 46, 47, 48, 58, 59, 64, 68, 69, 70, 75, 76, 87, 88, 89, 90].

Загальні питання для самоконтролю до розділу

- Які форм-фактори оптичних приймачів-передавачів існують?
- Які типи лазерів застосовують у передавачах?
- Як працює технологія Digital Diagnostic у приймально-передавальному обладнанні?
- Яке призначення медіаконвертерів у ВОЛЗ?
- Як працює волоконно-оптичний підсилювач EDFA?
- Яка роль компенсаторів дисперсії у DWDM-системах?

- Що таке PON-мережа, і як вона впливає на технологію FTTx?
- Які переваги XGS-PON порівняно з GPON?
- Чому розподільчі оптичні мережі ефективніші за традиційні кабельні системи?
 - Як працює технологія WDM у мультиплексорих?
 - Порівняйте форм-фактори оптичних трансиверів SFP+, QSFP28 та QSFP-DD за такими параметрами: максимальна швидкість передачі даних, типові роз'єми (LC, MPO/MTP), габарити, підтримка DAC/AOC та типові сфери застосування (ЦОД, магістральні мережі). У яких випадках доцільно використовувати AOC замість DAC для з'єднання обладнання в одному дата-центрі?
 - Поясніть принцип роботи лазерів VCSEL, FP та DFB у оптичних трансиверах, вказавши тип волокна (MMF/SMF), робочу довжину хвилі, максимальну дальність передачі та типові швидкості даних. Як вибір типу лазера впливає на розрахунок оптичного бюджету лінії (з урахуванням вихідної потужності та чутливості приймача за табл. 4.1.1.3)?
 - Опишіть функціональність Digital Diagnostic Monitoring (DDM) у трансиверах, вказавши параметри, що моніторяться в реальному часі (потужність Tx/Rx, напруга, температура), та їхню роль у запобіганні аварій на ВОЛЗ. Як електронна мітка модуля сприяє інвентаризації обладнання та сумісності з мережевими пристроями?

5. Вимірювальне обладнання

Вимірювання параметрів в оптичних мережах є ключовим етапом у забезпеченні стабільної та якісної передачі даних. Завдяки високій швидкості та великій пропускній здатності волоконно-оптичних систем, точність вимірювань відіграє важливу роль у підтримці оптимальної продуктивності мережі. Вимірювальні процедури дозволяють контролювати рівень згасання сигналу, виявляти пошкодження та перевіряти відповідність мережевих компонентів встановленим стандартам, що особливо важливо для телекомунікаційних операторів та підприємств з великим потоком даних.

З розвитком волоконно-оптичних технологій вимоги до вимірювань стають дедалі складнішими, а точність обладнання - критично важливою. Сучасні методи діагностики дозволяють оцінити якість сигналу, перевірити стан оптичного волокна та визначити місця можливих дефектів ще до того, як вони почнуть впливати на роботу мережі. Використання високоточних приладів, таких як оптичні тестери, вимірювачі оптичної потужності та рефлектометри, дає змогу швидко та ефективно оцінити стан інфраструктури.

Таким чином, вимірювальна техніка є невід'ємною складовою побудови та обслуговування оптоволоконних мереж. Вона дозволяє не лише контролювати якість, а й оптимізувати роботу всієї системи, зменшуючи ризики виникнення несправностей. Впровадження передових методів аналізу та моніторингу допомагає провайдерам підтримувати високий рівень обслуговування користувачів, гарантуючи стабільну та надійну передачу інформації.

Призначення та види вимірювань у волоконно-оптичних мережах:

- Профілактичні - призначені контролю технічного стану оптичного кабелю;
- Аварійні - призначені для швидкого визначення місця та характеру пошкоджень;
- Контрольні - здійснюються після ремонту та призначені для визначення якості виконання ремонтно-відновлювальних робіт.

Параметри вимірювані в процесі будівництва та експлуатації мереж:

- Коефіцієнт згасання
- Згасання: оптичних зростків та всієї кабельної траси
- Відстань до місця пошкодження та/або неоднорідності
- Рівні оптичної потужності: на виході випромінювача та на вході приймача

Згасання волоконно-оптичної лінії зв'язку теоретично можна порахувати:

$$ATT = \alpha \cdot L + A_s \cdot N_s + A_c \cdot N_c \quad (5.1)$$

де α - згасання кабелю (дБ/км), приймають 0,38 дБ/км на 1310 нм та 0,25 дБ/км на 1550 нм.

L - довжина кабелю (км)

A_s - згасання на нероз'ємних з'єднаннях (зварювання) (дБ), що приймають 0,01 дБ

N_s - кількість нероз'ємних з'єднань

A_c - згасання на роз'ємних з'єднаннях (дБ), що приймають 0,2 дБ

N_c - кількість роз'ємних з'єднань

5.1. Оптичні тестери

Оптичні тестери – чи вимірювачі оптичних втрат, призначені для вимірювання середнього рівня потужності оптичного випромінювання на робочих довжинах хвиль волоконно-оптичних ліній зв'язку та визначення сигналу в кабельній системі та окремих її компонентах.

Основні компоненти оптичного тестера – це вимірювач оптичної потужності та джерело випромінювання.

Вимірювач оптичної потужності (рис. 5.1.) використовується для визначення рівня потужності оптичного випромінювання. Як правило оптичні тестери можуть працювати на різних довжинах хвиль, що дозволяє тестувати різні типи оптичних кабелів, а також проводити тестування на різних довжинах хвиль для отримання необхідних та більш точних результатів. Деякі моделі мають функцію автоматичного калібрування для більшої точності вимірювань.



Рис. 5.1. Вимірювач оптичної потужності Tempo модель OPM510

Джерело оптичного випромінювання (рис. 5.2.) генерує стабільний оптичний сигнал для тестування кабельної системи. Джерело випромінювання може працювати на фіксованих або змінних довжинах хвиль, в залежності від

моделі та виробника. Джерело випромінювання використовується для перевірки цілісності оптичного волокна та виявлення пошкоджень.



Рис. 5.2. Джерело випромінювання компанії Темпо модель SLS525

Інколи пристрої, у яких вимірювач оптичної потужності та джерело випромінювання розташовані в одному корпусі, називають оптичними мультиметрами (рис. 5.3.).



Рис. 5.3. Оптичний мультиметр компанії Grandway модель FHM2A01

Деякі моделі оптичних тестерів можуть бути оснащені додатковими функціями:

- візуальні локатори пошкоджень (VFL) – використовують лазерне випромінювання для виявлення розривів або вигинів у волокні.
- ідентифікатори активних волокон – допомагають визначити, які волокна використовуються для передачі даних у реальному часі.

Візуальні локатори пошкоджень (VFL) – це пристрої, які використовують лазерне випромінювання для виявлення дефектів у волоконно-оптичних кабелях. Вони допомагають знайти переломи, вигини та місця пошкоджень, які можуть впливати на якість сигналу.

Основні характеристики:

- Джерело світла: лазерний діод класу IIIA.
- Довжина хвилі: 650 нм (червоне світло).
- Дальність дії: до 5 км.
- Режим роботи: постійне світіння (CW) або імпульсний режим (миготіння).
- Сумісність: конектори FC, SC, ST, LC.
- Живлення: 2 батареї AAA, час роботи - до 60 годин.

Візуальні локатори пошкоджень (тестер цілісності оптоволоконного) часто використовуються для швидкої діагностики в польових умовах, коли потрібно оперативно знайти місце пошкодження без складного обладнання. Візуальний локатор пошкоджень показаний на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Тестер цілісності оптоволоконного кабелю компанії Pro'sKit модель MT-7510.

Ідентифікатори активних волокон (рис. 5.5.) допомагають уникнути випадкового розриву активного волокна під час технічного обслуговування.

Основні функції:

- Визначення активного сигналу без необхідності розриву з'єднання.
- Перевірка напрямку передачі даних.
- Вимірювання рівня потужності сигналу.
- Сумісність з одномодовими та багатомодовими волокнами.



Рис. 5.5. Ідентифікатор активних волокон Multitest.

Ці пристрої особливо корисні для технічного персоналу, який працює з великими оптичними мережами та хоче уникнути помилок при обслуговуванні.

Оптичні тестери широко застосовуються в телекомунікаційних мережах, інтернет-провайдерах та інженерних службах для забезпечення стабільної роботи оптоволоконних систем.

5.1.1. Методи вимірювання згасання

Вимірювання згасання в оптичних системах є важливим аспектом контролю якості передачі сигналу. Оптичне згасання визначає, наскільки ослаблюється потік світла при проходженні через волокно, з'єднання або інші компоненти мережі. Високоточні методи вимірювання дозволяють оцінити ефективність роботи мережі, виявити дефекти та оптимізувати параметри передачі даних. Точне визначення згасання критично важливе для підтримки стабільності оптичних комунікацій, особливо у довготривалих магістральних з'єднаннях та високошвидкісних мережах.

Існують різні методи вимірювання згасання, кожен з яких має свої переваги та сферу застосування. До основних належать метод згасання, що вноситься та метод обриву.

Метод згасання, що вноситься – є одним із основних способів вимірювання втрат в оптичних системах. Він використовується для оцінки

загального згасання сигналу при проходженні через оптичний кабель, з'єднання або компонент мережі.

Основний принцип методу передбачає вимірювання потужності оптичного сигналу до та після проходження через тестований елемент. Різниця між цими значеннями визначає рівень згасання. Цей метод проводиться в два етапи: калібрування приладів (рис. 5.6.) та вимірювання згасання (рис. 5.7.).

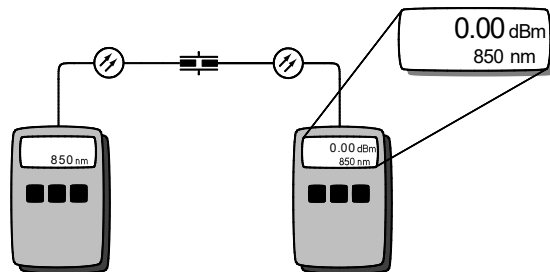


Рис. 5.61. Калібрування приладів – 1 етап

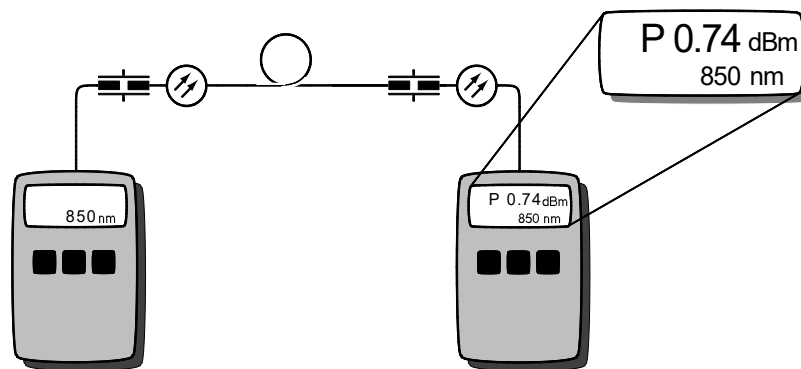


Рис. 5.7. Визначення згасання – 2 етап

Переваги:

Облік та виключення з результатів вимірювання втрат потужності на вході та виході вимірюваного об'єкта.

Недоліки: Необхідність забезпечення приблизної рівності цих втрат під час проведення калібрування та у робочому режимі.

Метод обриву – є одним із практичних способів вимірювання згасання в оптичних системах. Його застосовують для визначення загальних втрат у волоконно-оптичному кабелі, особливо при тестуванні нових ліній або лабораторних дослідженнях.

Процес реалізації методу включає підключення волокна до джерела випромінювання, фіксацію початкового рівня вихідного сигналу, а потім відрізання невеликого фрагмента кабелю (1-1,5 м) з передавальної сторони. Після цього проводиться нове вимірювання рівня потужності на приймальній стороні, а отримана різниця сигналів визначає шукане згасання. Щоб підвищити точність результатів, рекомендується здійснити кілька обрізків

волокна, а вхідний рівень сигналу розрахувати як середнє значення з отриманих вимірювань.

Цей метод має певні обмеження, оскільки потребує фізичного розриву оптичного волокна, що не завжди можливо для вже функціонуючих мереж. Однак його застосування забезпечує високу точність вимірювань та дозволяє ефективно оцінювати параметри згасання на окремих ділянках кабелю.

5.2. Оптичні рефлектометри

Метод згасання зворотного розсіювання є одним із найважливіших інструментів для аналізу оптичних мереж. Він дозволяє визначати згасання сигналу вздовж усього кабелю, локалізувати пошкодження та оцінювати якість з'єднань. Принцип роботи цього методу базується на випромінюванні коротких лазерних імпульсів у волокно та аналізі відбитого сигналу, що повертається через розсіювання та рефлексію на неоднорідностях кабелю. Це забезпечує точну картину стану оптичного волокна без необхідності фізичного втручання.

Оптичні рефлектометри (OTDR - Optical Time Domain Reflectometer) вважаються одними з найпотужніших інструментів для тестування волоконно-оптичних кабелів. Вони широко використовуються на різних етапах життєвого циклу мережі: під час будівництва, атестації, експлуатаційного обслуговування, профілактичних перевірок, ремонтно-відновлювальних робіт та інших технічних операцій. Оптичний рефлектометр показаний на рис. 5.8.



Рис. 5.8. Оптичний рефлектометр компанії EXFO модель FTB-1

Завдяки OTDR можна не лише оцінити згасання сигналу, а й знайти дефекти у волокні, визначити довжину волоконно-оптичного кабелю та перевірити місця зварних з'єднань. Це робить OTDR незамінним пристроєм для підтримки надійності та ефективності сучасних телекомунікаційних систем. Приклади рефлектограм показані на рис. 5.9. та 5.10.

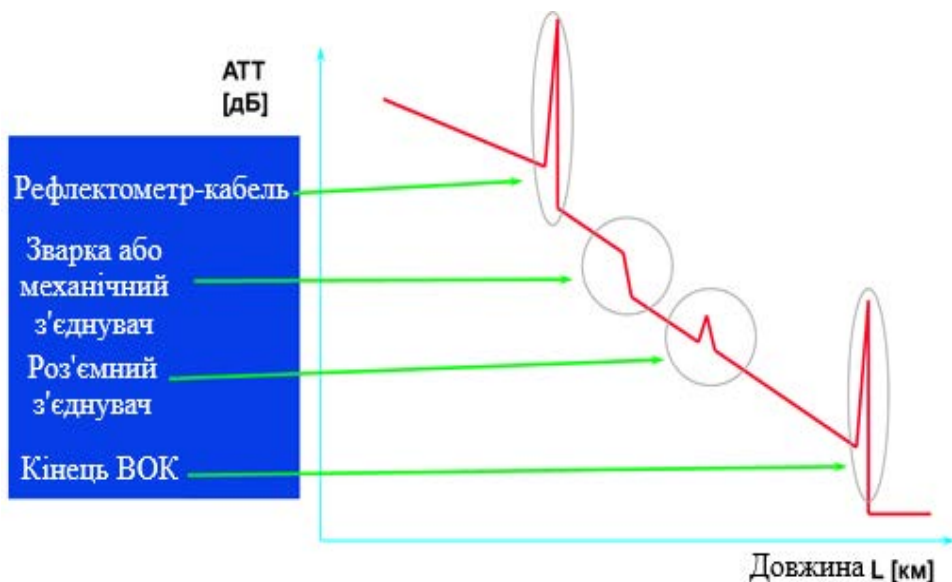


Рис. 5.9. Рефлектограма OTDR

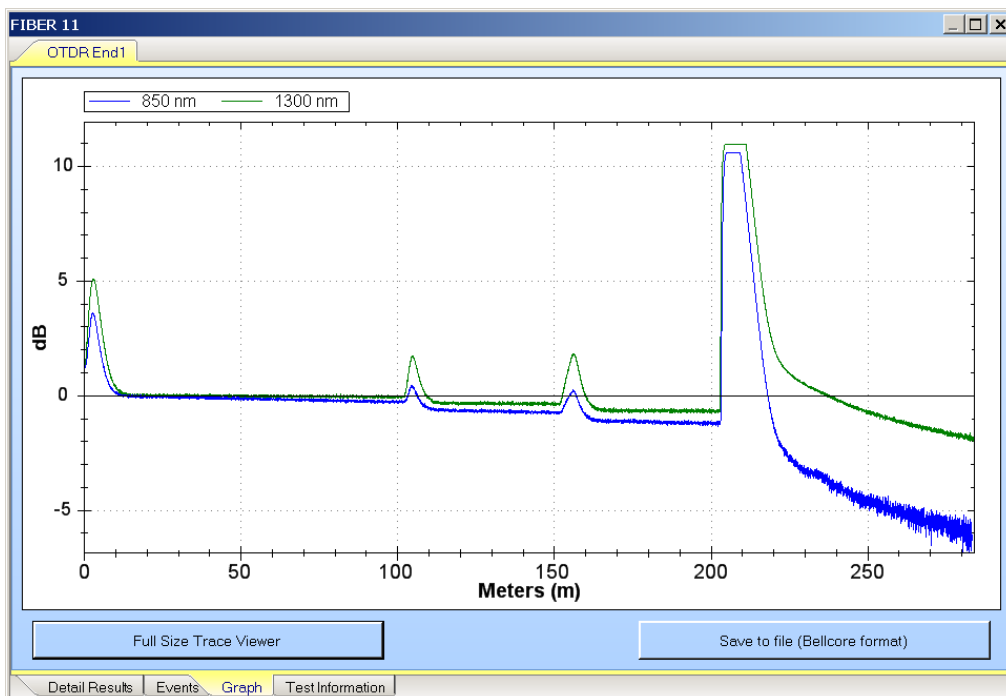


Рис. 5.10. Рефлектограма багатомодового сегмента завдовжки 203 м (прилад Fluke Networks DTX-OTDR).

Залежно від моделі рефлектометра перед виконанням вимірювання рекомендується встановити узгоджувальний оптичний кабель (з'єднувальну катушку) певної довжини, яка повинна бути більше «мертвої зони» рефлектометра, яка створюється на початку рефлектограми. «Мертва зона» виникає в результаті відбиття сигналу на оптичному конекторі до якого підключається рефлектометр. Лише за їх наявності можна точно визначити характеристики першого та останнього з'єднання у тестованому сегменті, що є найбільш точним методом вимірювання. Ця процедура може мати різні назви: установка компенсації, встановлення волокон погоджувального елемента.

Переваги OTDR:

- Дозволяє за один цикл вимірювань одночасно визначити цілу низку основних параметрів оптичного кабелю, у тому числі його довжину, погонне згасання, наявність та місце розташування місць неоднорідностей та пошкоджень, їх характер, втрати у з'єднувачах, зростках тощо. без проведення складних підготовчих робіт;

- На відміну від оптичного тестера, допускає виконання всього комплексу вимірювань з одного кінця оптичного кабелю.

- Недоліки:

- Обмежений динамічний діапазон (не більше 40 дБ), що пов'язані з невеликою потужністю зворотного розсіювання сигналу;

- Висока вимогливість до якості введення випромінювання в волокно, що тестується;

- Неможливість проведення вимірювань у реальному масштабі часу (час отримання досить якісної рефлектограми не менше 30 с);

- Велика вартість.

Слід запам'ятати, що проводити вимірювання за допомогою OTDR можна тільки на неактивних волокнах, бо оптичний приймач рефлектометра дуже чутливий елемент і його дуже легко пошкодити оптичним сигналом від працюючого по волокну обладнання.

Використана література для написання розділу [8, 13, 14, 17, 18, 21, 25, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 63].

Загальні питання для самоконтролю до розділу

- Які основні методи вимірювання параметрів у ВОЛЗ?
- Як працює оптичний тестер?
- Чим відрізняється оптичний мультиметр від тестера потужності?
- Для чого застосовують візуальні локатори пошкоджень (VFL)?
- Як працює OTDR-рефлектометр?
- Чому рефлектометрія є важливою частиною технічного обслуговування ВОЛЗ?
- Як визначається довжина волокна за допомогою рефлектографії?

- Які переваги має OTDR порівняно з іншими методами вимірювання згасання?

- Як впливає температура навколишнього середовища на вимірювання у ВОЛЗ?

- Яке значення мають компенсаційні котушки у вимірюваннях OTDR?

- Порівняйте методи вимірювання згасання «внесеного згасання» (insertion loss) та «обриву» (cut-back) за такими параметрами: кількість етапів вимірювання, необхідність фізичного втручання у волокно, точність результатів, сфера застосування (лабораторія, польові умови, активні/неактивні лінії) та вплив втрат на конекторах приладу. У яких випадках метод обриву є неприйнятним, а внесеного згасання — єдиним можливим?

- Поясніть принцип роботи візуального локатора пошкоджень (VFL) на довжині хвилі 650 нм, вказавши фізичний ефект (випромінювання через мікротріщини/вигин), режими роботи (CW/імпульсний), максимальну дальність (до 5 км), типи конекторів (FC/SC/ST/LC) та обмеження методу (неможливість кількісного вимірювання втрат). Як VFL доповнює ідентифікатор активних волокон при обслуговуванні PON-мереж?

- Порівняйте оптичний тестер (джерело + вимірювач потужності) та OTDR за такими критеріями: напрямок вимірювання (односторонній/двосторонній), вимірювані параметри (згасання, довжина, місце пошкодження), необхідність доступу до обох кінців лінії, динамічний діапазон, час вимірювання, вартість, можливість роботи на активних волокнах. У яких сценаріях (профілактика, аварія, атестація) доцільно комбінувати обидва прилади?

6. Оптична транспортна мережа (OTN) та її взаємодія з DWDM системами.

6.1. OTN - що це таке і чому вона важлива.

Оптична транспортна мережа (OTN, Optical Transport Network) – це сучасний стандарт передачі даних у телекомунікаційних магістралях, який забезпечує ефективне мультиплексування, комутацію та управління оптичним трафіком. Технологія OTN розроблена для передачі (транспортування) по волоконно-оптичним кабелям з високою швидкістю, надійністю та ефективністю різних типів даних, завдяки стандартизованим форматам кадрів та вбудованій корекції помилок. OTN дозволяє операторам зв'язку оптимізувати використання оптичного волокна та підвищити надійність передачі даних в мережі.

OTN має ряд особливостей, серед яких слід відзначити наступні:

- *ієрархічна структура*: OTN підтримує кілька рівнів мультиплексування (ODU - Optical Data Unit), що дозволяє ефективно передавати різні типи протоколів/технологій, такі як Ethernet, SDH/SONET, IP, або відеопотоки;

- *висока пропускна здатність*: OTN підтримує швидкості від 1 Гбіт/с (OTU1) до 100 Гбіт/с (OTU4) і вище (сучасні системи масштабуються до терабітних швидкостей);

- *керування помилками*: OTN має вбудовані механізми FEC (Forward Error Correction), за допомогою якого зменшується кількість помилок при передачі даних на великі відстані;

- *гнучкість*: OTN дозволяє об'єднувати різні протоколи та формати даних в єдиному транспортному потоці, що значно спрощує інтеграцію;

- *моніторинг і керування*: OTN забезпечує розширені функції для діагностики мережі, виявлення несправностей та управління якістю сигналу (як приклад, використання TCM - Tandem Connection Monitoring).

Приклад побудови мережі OTN показаний на рис. 6.1.

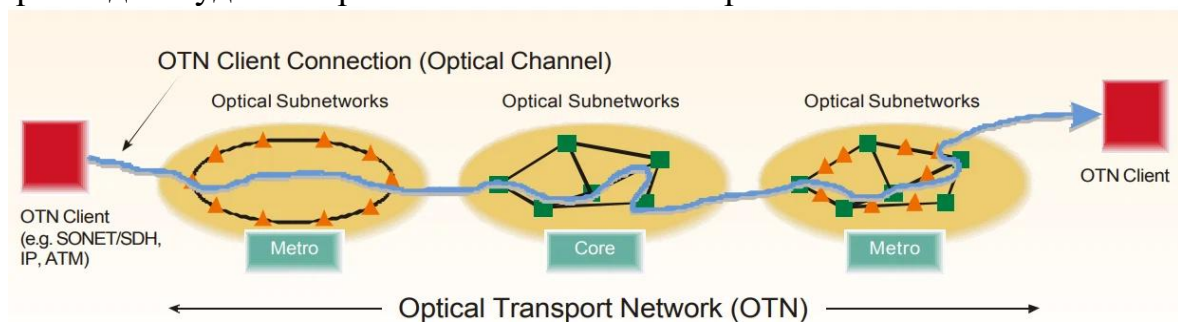


Рис. 6.1. Оптична транспортна мережа (OTN)

OTN базується на рекомендаціях Міжнародного союзу електров'язку (ITU-T). Серед основних треба відмітити такі:

- *ITU-T G.709*: визначає структуру кадру OTN, рівні мультиплексування (ODU, OTU), FEC, і методи керування;

- *ITU-T G.798*: описує функціональні характеристики обладнання OTN, включаючи обробку сигналів і моніторинг;

- *ITU-T G.872*: архітектура OTN, включаючи ієрархію шарів (клієнтський, ODU, OTU, OCh);

- *ITU-T G.694.1*: визначає спектральну сітку для DWDM, що тісно пов'язана з OTN для передачі множинних каналів;

- *ITU-T G.959.1*: фізичні параметри оптичних інтерфейсів для OTN, включаючи потужність сигналу та чутливість.

Останні версії стандартів (станом на 2025 рік) підтримують швидкості OTUCn для 200 Гбіт/с і вище, від OTU1 (2.5 Гбіт/с) до OTU4 (100 Гбіт/с) і вище, гнучкі сітки (Flex-Grid) і розширені функції для когерентної передачі. Flex-Grid дозволяє динамічно виділяти спектр (наприклад, 37.5 ГГц замість фіксованих 50 ГГц), що підвищує ефективність використання волокна.

Особливу увагу варто звернути на стандарт ITU-T G.872, який описує архітектуру OTN:

- *клієнтський рівень*: дані клієнта (Ethernet, SDH тощо) упаковуються в ODU (Optical Data Unit);

- *оптичний канал (OCh)*: відповідає за передачу даних через оптичне волокно;

- *оптична транспортна одиниця (OTU)*: додає FEC (Forward Error Correction) і метадані для керування передачею;

- *фізичний рівень*: використовує DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) для передачі кількох каналів по одному волокну.

Для розуміння швидкостей та переваг слід порівняти OTN з іншими технологіями передачі даних (табл. 6.1.).

Табл. 6.1. Порівняльна таблиця швидкостей та переваг OTN з іншими технологіями передачі даних

Характеристика	OTN	SDH/SONET	MPLS	Ethernet
Пропускна здатність	До 800G+ (Flex-Grid, OTUCn)	До 40G (обмежена)	Залежить від транспорту	До 400G, але без FEC
Корекція помилок	Вбудована FEC (SD-FEC)	Обмежена	Немає	Немає
Мультиплексування	Гнучке (ODU, TDM, WDM)	Жорстке (TDM)	Пакетне	Немає
Моніторинг	Розширений (TCM, BIP-8)	Базовий	Залежить від обладнання	Обмежений

Масштабованість	Висока (Flex-Grid, ROADM)	Низька	Висока (пакетний рівень)	Середня
Застосування	Магістралі , ЦОД, 5G	Легасі- мережі	Корпоративн і мережі, VPN	Локальні мережі, ЦОД

Також слід зазначити, OTN та OSI (Open Systems Interconnection) пов'язані в контексті мережевих технологій, але вони мають різні призначення та рівні абстракції.

OSI (Open Systems Interconnection) – це концептуальна модель, яка описує, як дані передаються між системами через мережу. Вона поділена на 7 рівнів (фізичний, каналний, мережевий, транспортний, сеансовий, представлення, прикладний), кожен з яких відповідає за певний аспект комунікації. OSI – це теоретична модель, яка допомагає стандартизувати та структурувати мережеві протоколи. Вона не є конкретною технологією, а лише шаблоном. На відміну від OSI, OTN – це практична реалізація, яка забезпечує високошвидкісну передачу даних і використовується в реальних мережах.

OTN – це технологія фізичного рівня передачі даних, яка використовується для високошвидкісного транспортування даних через оптичні мережі. Вона стандартизована ITU-T рекомендацією G.709, як зазначалось вище, і зазвичай застосовується в магістральних мережах.

Співвідношення рівнів в моделі OSI: OTN працює переважно на фізичному рівні (Layer 1) моделі OSI, забезпечуючи транспортування бітів через оптичні волокна. Вона відповідає за передачу сирих даних без обробки їх вмісту. У деяких випадках OTN може частково зачіпати каналний рівень (Layer 2), наприклад, через механізми мультиплексування (TDM або WDM) або управління помилками.

Умовно можна сказати, що мережі OTN – це фізичний рівень (оптичні кабелі, як середина перепедачі) моделі OSI. Вищі рівні OSI (наприклад, IP на мережевому рівні або TCP на транспортному) працюють поверх OTN, використовуючи її як транспортну основу (рис. 6.2.). Наприклад, дані, передані через Інтернет (прикладний рівень OSI), можуть бути упаковані в IP-пакети (мережевий рівень), а потім передані через оптичну мережу, побудовану на основі OTN (фізичний рівень).

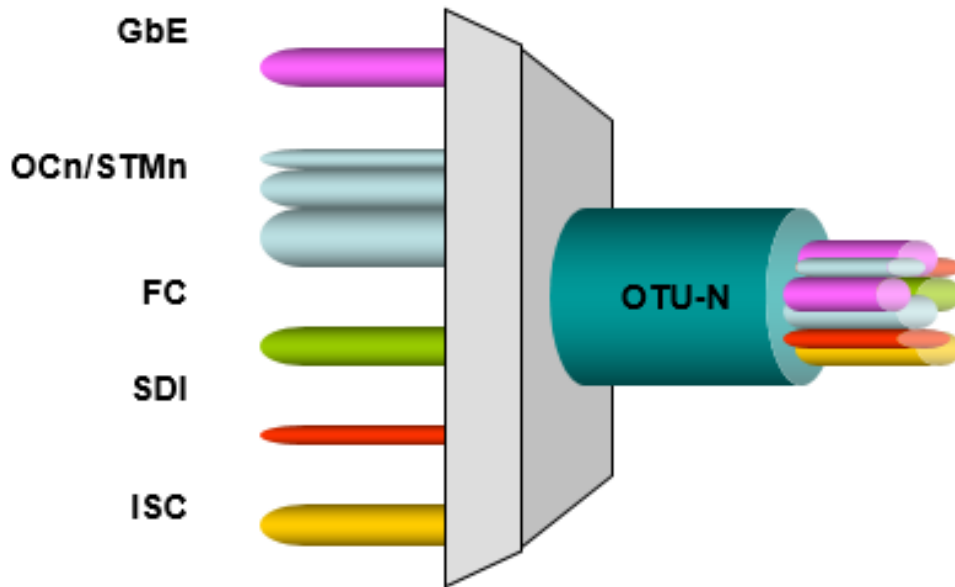


Рис. 6.2. Передача різних технологій передачі даних за допомогою OTN.

Отже, OTN є технологією, яка реалізує функції фізичного рівня моделі OSI (і частково каналного) у високошвидкісних оптичних мережах.

Обладнання OTN варіюється від відносно компактних пристроїв для доступу і до складних систем для організації магістральних мереж. Це обладнання можна розділити за основними типами на таке:

- транспондери – перетворюють клієнтські сигнали (Ethernet, SDH, Fibre Channel) у формат OTN (ODU/OTU), наприклад, транспондер 100G може перетворити 100G Ethernet у OTU4;

- мукспондери – об'єднують кілька низькошвидкісних ODU, Optical Data Unit, (наприклад, ODU2) в один високошвидкісний канал (наприклад, ODU4);

- кросконектори – використовуються для комутації ODU між різними портами, забезпечуючи гнучке маршрутизування в мережі;

- оптичні лінійні системи – включають підсилювачі (EDFA), ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers) і модулі компенсації дисперсії для передачі OTN через DWDM.

- клієнтські інтерфейси – підтримують різні протоколи (10G/40G/100G Ethernet, STM-64, 16G Fibre Channel).

ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers) – це програмований оптичний пристрій, який використовується в мережах з мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM), зокрема в DWDM-системах. Його головна перевага – можливість динамічно змінювати маршрутизацію оптичних каналів без фізичного втручання.

Сучасне обладнання OTN підтримує когерентну передачу (підтримка типів модуляції: DP-QPSK, 16QAM, 64QAM), що дозволяє досягати швидкостей

400G/800G на канал, а також інтеграцію з SDN (Software-Defined Networking) для автоматизації керування (рис. 6.3. - 6.5.)

Когерентні методи прийому та передачі інформації

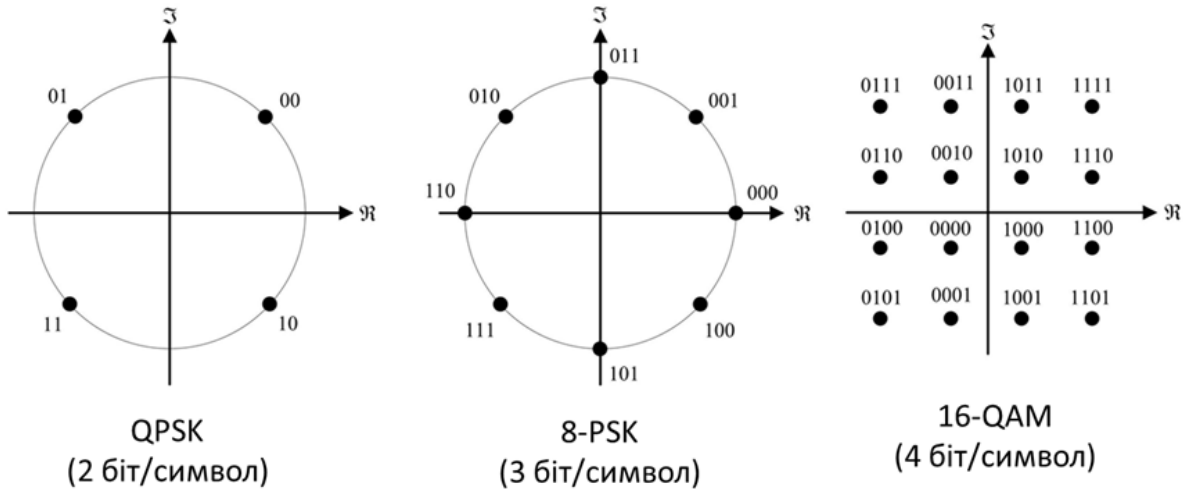


Рис. 6.3. Приклади типів модуляції QAM та QPSK.

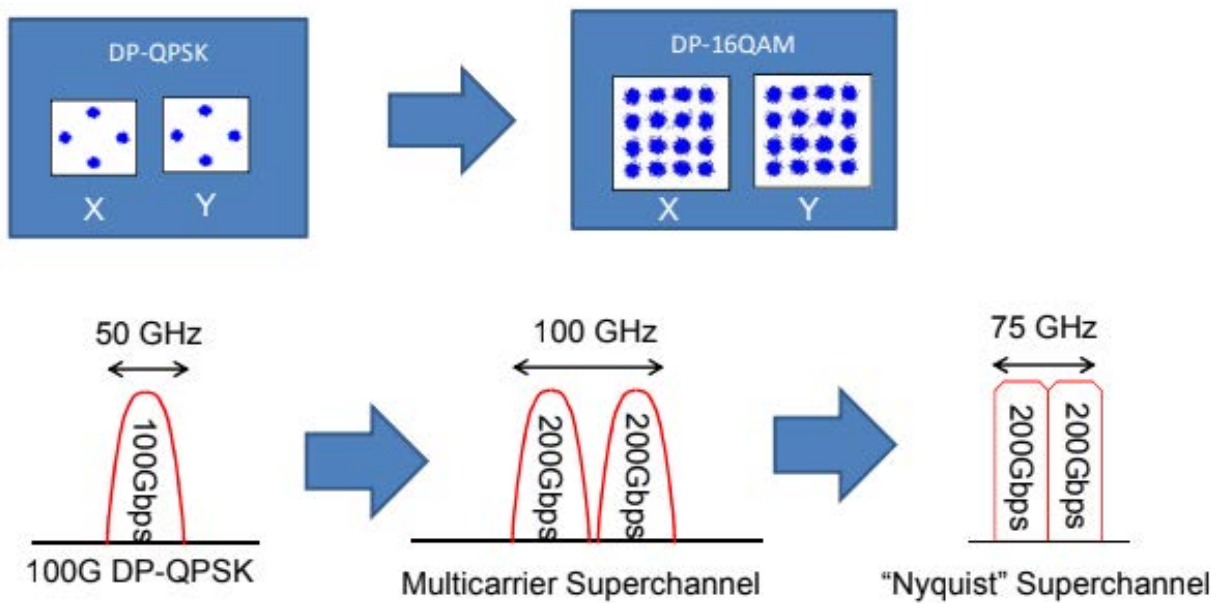


Рис. 6.4. Приклади типів модуляції DP-QPSK та DP-16QAM

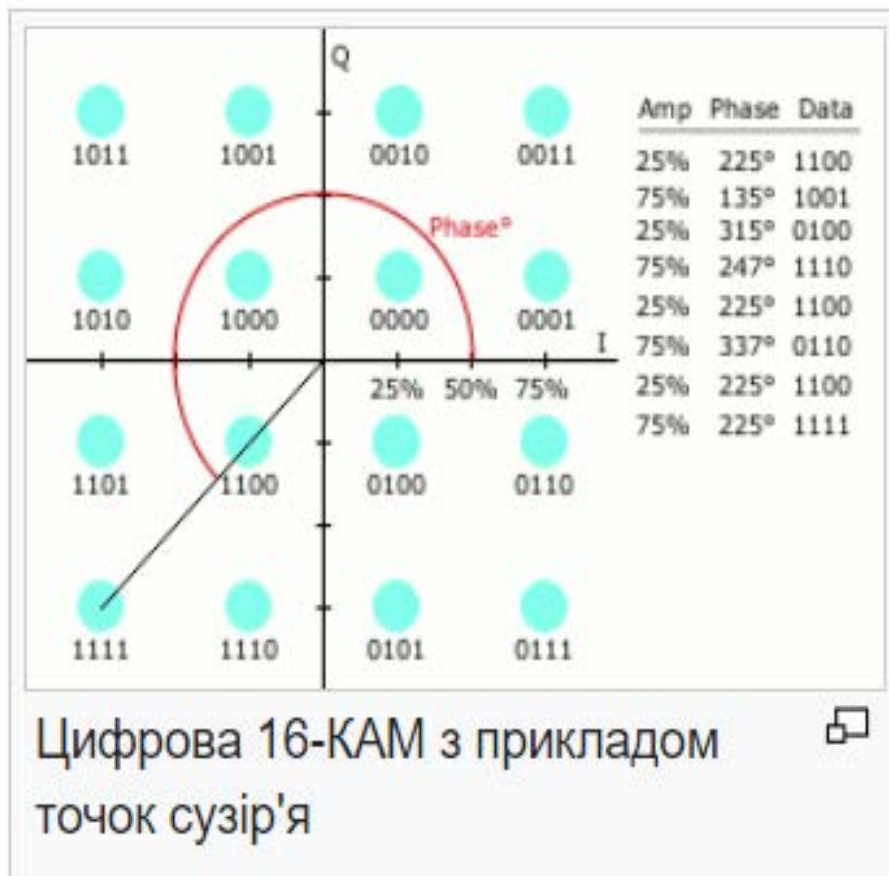


Рис. 6.5. Формування модуляції 16QAM.

На 2025 рік найбільш розповсюдженим в Україні на мережах операторів зв'язку та інтернет провайдерів є обладнання наступних вендорів:

Nokia (колишній Alcatel-Lucent): Серія 1830 PSS для OTN і DWDM.

Cisco: NCS-серія для інтеграції OTN з IP/MPLS.

DWDM.ME: платформа передачі даних серії MU та .

Ciena: Платформи WaveServer та Packet Optical Platform 6500 для гнучких OTN/DWDM-рішень.

Infinera: Платформи з підтримкою Flex-Grid і когерентних технологій.

Huawei: OptiX OSN для магістральних і метро-мереж.

Нижче на рис. 6.6 – 6.10 наведені приклади обладнання OTN виробництва компанії DWDM.ME. та їх технічні характеристики.

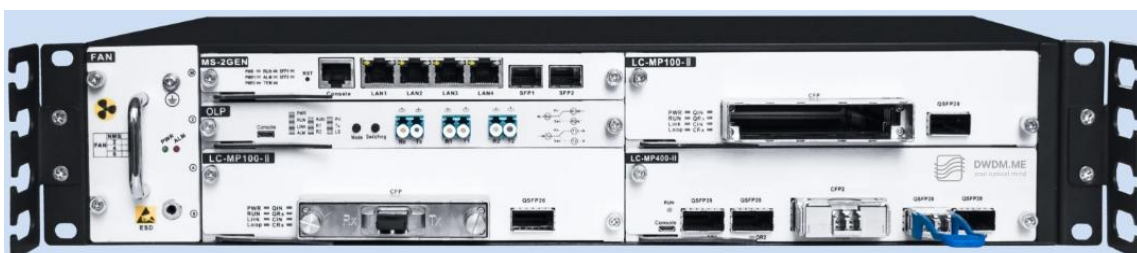


Рис. 6.6. Одноюнітне (1U) шасі MU-70-ACDC компанії DWDM.ME.

Технічні характеристики обладнання 1U шасі MU-70-ACDC:

- Шасі операторського класу висотою 1U з 4 слотами, резервним джерелом живлення змінної/постійної напруги та блоком вентиляторів;
- Підтримка змішаної передачі даних 10G/100G/200G/400G;
- Стандартний 19-дюймовий корпус 1U на 4 слоти;
- Уніфікована платформа: підтримує змішану установку різних сервісних карт та єдине керування мережею;
- Одна стійка підтримує мультиплексування та демультиплексування до 3×16 довжин хвиль, переадресацію послуг до $12 \times 10G$, $1 \times 100G$, $1 \times 200G$;
- Висока надійність: модульна конструкція блоку живлення, підтримка підключення та відключення, подвійний блок живлення із захистом 1+1;
- Можливість встановлення блоків живлення: $2 \times DC -48V$, $2 \times AC 220V$ або дубльований DC та AC;
- Потужність: повний комплект <100 Вт;
- Розміри (W x H x D) $482.5 \times 44.5 \times 320$ мм.



Рис. 6.7. П'ятиюнітове (5U) шасі MU-380-ACDC та двоюнітове (2U) шасі MU-180-ACDC компанії DWDM.ME.

Технічні характеристики обладнання 2U шасі MU-180-ACDC:

- Шасі операторського класу висотою 2U з 8 слотами, резервним джерелом живлення змінної/постійної напруги та блоком вентиляторів;
- Підтримка змішаної передачі даних 10G/100G/200G/400G;
- Стандартний 19-дюймовий корпус 2U на 8 слотів;
- Уніфікована платформа: підтримує змішану установку різних сервісних карт та єдине керування мережею;
- Одна стійка підтримує мультиплексування та демультиплексування до 7×16 довжин хвиль, переадресацію послуг до $28 \times 10G$, $4 \times 100G$, $4 \times 200G$;
- Висока надійність: модульна конструкція блоку живлення, підтримка підключення та відключення, подвійний блок живлення із захистом 1+1;
- Можливість встановлення блоків живлення: $2 \times DC -48V$, $2 \times AC 220V$ або дубльований DC та AC;
- Потужність що споживається <200 Вт (у зборі);

- Розміри (W x H x D) 482.5×89×350мм.

Технічні характеристики обладнання 5U шасі MU-380-ACDC:

- Шасі операторського класу висотою 5U з 20 слотами, резервним джерелом живлення змінної/постійної напруги та блоком вентиляторів;
- Підтримка змішаної передачі даних 10G/100G/200G/400G;
- Стандартний 19-дюймовий корпус 5U на 20 слотів;
- Уніфікована платформа: підтримує змішану установку різних сервісних карт та єдине керування мережею;
- Одна стійка підтримує мультиплексування та демультіплексування до 19×16 довжин хвиль, переадресацію послуг до 76x10G, 9x100G, 9x200G;
- Висока надійність: модульна конструкція блоку живлення, підтримка підключення та відключення, подвійний блок живлення із захистом 1+1;
- Можливість встановлення блоків живлення: 2xDC -48V, 2xAC 220V або дубльований DC та AC;
- Споживана потужність < 500W (у повній комплектації);
- Розміри (W x H x D) 482.5×222.5×350мм.



Рис. 6.8. Платформа серії DCU (DCI - Data Centre Interconnect) компанії DWDM.ME.

Технічні характеристики обладнання платформа серії DCU:

- Пропускна здатність 96x200 Гбіт/с /60x400 Гбіт/с
- Підтримує лінійну швидкість 100G / 200G / 300G / 400G на один канал DWDM
- Має модульну конструкцію з великим вибором сервісних карт
- Підтримує можливості мережевого керування CLI / SNMP / WEB.
- Підтримує можливості інтерфейсу моделі YANG і методи управління Web, CLI, SNMP.
- Підтримує функцію WSS карт до 9 напрямлень.
- Підтримує швидкість 800G на один сервісний слот шасі.
- Має подвійне джерело живлення 1 + 1 резервний AC220V / HVDC / -48V опціонально.
- Клієнтська сторона забезпечує стандарти та швидкість передачі даних: 10GE / 100GE / STM-x / 100G OTU4 / 200GE / 400GE.



Рис. 6.9. Транспондер LC-MP100-II - 100G (QSFP28 to CFP-DCO) компанії DWDM.ME.

LC-MP100-II - 100G (QSFP28 to CFP-DCO) – це сервісна плата транспондера для встановлення в шасі компанії DWDM.ME. Плата підтримує одноканальну передачу великих пакетів зі швидкістю 100 Гбіт/с та здійснює передачу на наддалекі відстані. Завдяки технології кодування з прямою корекцією помилок FEC досягається передача на 1500 км без електричного відновлення. Підтримує клієнтський інтерфейс модуля QSFP28 та лінійний інтерфейс когерентного модуля CFP DWDM 100G. Забезпечує великий допуск на дисперсію завдяки використанню технологій когерентних хвиль та DSP (Digital Signal Processing), що дозволяє організувати лінк до 1500 км без компенсації дисперсії. Підтримує моніторинг OSNR в реальному часі.



Рис. 6.10. Когерентний оптичний модуль 100G CFP (DCO) компанії DWDM.ME.

Когерентний оптичний модуль 100G CFP (DCO) призначений для роботи оптичному кабелю: два волокна – передача (Tx) та прийом (Rx). На стороні передачі модуль перетворює входні електричні канали 25,78 Гбіт/с (CAUI-4) або 27,95 Гбіт/с (OTL4.4) в один оптичний сигнал (Single Lambda) 100G. Модуль має мінімальний гарантований оптичний бюджет 18,5 дБ, що у більшості випадків достатньо для досягнення відстані 80 км без посилення сигналу (з посиленням сигналу модуль може досягати відстані до 2400 км). Приймач підтримує діагностику оптичного каналу зв'язку DDM/DOM в режимі реального часу. Має вбудований генератор та перевірку Line & Client PRBS, які допомагають проводити діагностику та тестування. Модуль має подвійний роз'єм LC, спрямований у бік лінії. З боку хоста розташований 148-контактний роз'єм, сумісний із CFP2 MSA.

PRBS - псевдовипадкова двійкова послідовність (англ. Pseudorandom Binary Sequence). Це послідовність бітів, яка має властивості випадковості, але насправді генерується детермінованим алгоритмом. Іншими словами, це послідовність, що змінюється між двома станами (0 і 1), але при цьому виглядає як випадкова. PRBS використовується для тестування та вимірювання якості каналів зв'язку, наприклад, для визначення коефіцієнта бітових помилок (BER).

6.2. Що таке когерентна передача? Кілька слів про когерентну передачу сигналів.

Когерентна передача – це метод оптичної модуляції та прийому, який використовує амплітуду, фазу та поляризацію світлової хвилі для передачі інформації. На відміну від некогерентної (інтенсивнісної) передачі, когерентна дозволяє значно підвищити чутливість приймача, збільшити дальність передачі та ефективно використовувати спектр. Когерентна передача дозволяє використовувати складні види модуляції (наприклад, QPSK, 16QAM, 64QAM) і цифрову обробку сигналів (DSP) для підвищення пропускної здатності та дальності передачі.

Основні принципи когерентної передачі:

- локальний осцилятор: на приймальній стороні використовується лазер (локальний осцилятор або гетеродин), який синхронізується з частотою входного сигналу для відновлення фази та амплітуди (фактично це є гетеродинний принцип).

- складна модуляція: замість простої амплітудної модуляції (NRZ) використовуються фазові та амплітудно-фазові модуляції (наприклад, DP-QPSK, 16QAM), що дозволяють кодувати більше бітів на символ.

- цифрова обробка сигналів (DSP): компенсує оптичні спотворення (хроматична дисперсія, поляризаційна дисперсія, шум) у реальному часі.

Більш детально про те, як працює когерентна передача.

Обладнання, яке використовується для передачі когерентного сигналу модулює сигнал за допомогою складних схем (наприклад, DP-QPSK кодує 4

біти на символ, 16QAM – 8 бітів) та використовує поляризаційне мультиплексування (dual-polarization), що подвоює пропускну здатність на одній довжині хвилі.

Відповідно, когерентний приймач змішує вхідний сигнал з локальним осцилятором, відновлюючи фазу та амплітуду сигналу, після чого виконується цифрова обробка сигналу (DSP), компенсуючи спотворення та шум. Після цього, у поєднанні з когерентною передачею використовується вдосконалений механізм коєкції помилок FEC (наприклад, SD-FEC), що дає можливість значно підвищити стійкість до помилок.

Приклад: у системі 100G DWDM когерентний приймач використовує гетеродинний принцип для зчитування сигналу, який передається на довжині хвилі ~1550 нм. Опорний лазер (локальний осцилятор) змішується з вхідним сигналом, і DSP розшифровує дані, навіть якщо сигнал пройшов сотні кілометрів.

При всіх своїх перевагах когерентна передача має і свої обмеження, які виражаються в складності обладнання: когерентні транспондери дорожчі через потребу в потужних DSP і точних лазерах. Складна модуляція та DSP збільшують енергоспоживання порівняно з некогерентними системами. Окрім цього високорівневі модуляції (64QAM) вимагають високого співвідношення сигнал/шум (OSNR), що обмежує їх використання на дуже довгих дистанціях без використання підслювачів.

6.3. Інтеграція OTN з DWDM.

Як видно по архітектурі OTN, прописаній в стандарті G.872, ця технологія дуже тісно взаємодіє з DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), що дозволяє мультиплексувати кілька оптичних сигналів на різних довжинах хвиль у межах одного оптичного волокна. При цьому OTN виконує роль транспорту для DWDM, забезпечуючи ефективну інкапсуляцію клієнтських сигналів у стандартизовані ODU (Optical Data Unit), що покращує управління мережею та зменшує затримку при передачі сигналу (хоча правильніше буде забезпечує низьку затримку для критичних застосувань). Все це разом забезпечує високу пропускну здатність та масштабованість мережі, що є критично важливим для сучасних магістральних мереж.

Окремо слід пояснити про FEC. Цей механізм є однією з ключових особливостей OTN і дозволяє значно покращити якість переданого сигналу. DWDM передає сигнали на великі відстані, і без корекції помилок можливі суттєві втрати та спотворення даних завдяки таким явищам як згасання та дисперсії, які ми розглядали в розділах 2.3.1 та 2.5.2. OTN компенсує ці втрати, що дозволяє збільшити дальність передачі без необхідності регенерації сигналу. Це робить OTN незамінним елементом сучасних DWDM-мереж.

OTN також додає рівень гнучкого управління трафіком, що дозволяє операторам динамічно перенаправляти потоки даних, резервувати канали та швидко реагувати на зміни у навантаженні мережі.

Як згадувалось вище DWDM система працює за принципом фіксованих довжин хвиль (дивись таблицю DWDM-каналів у розділі 3.9.3), але OTN доповнює її механізмами моніторингу та адаптивного перерозподілу ресурсів. Це забезпечує високу ефективність використання оптичного спектра та оптимізує затрати на обладнання.

Інтеграція оптичної транспортної мережі (OTN) з технологією щільного хвильового мультиплексування (DWDM) є ключовим елементом сучасних телекомунікаційних мереж. DWDM дозволяє значно збільшити пропускну здатність одного оптичного волокна шляхом передачі кількох сигналів на різних довжинах хвиль, а OTN забезпечує ефективне упакування, керування та захист даних у цих каналах.

Отже, з урахуванням всього вищевказаного, можна визначити ключові моменти, завдяки яким OTN інтегрується з DWDM та має ряд переваг при побудові та експлуатації високошвидкісних магістралей:

- мультиплексування каналів – OTN формує оптичні канали (OCh), які передаються через DWDM, кожен канал OTN займає окрему довжину хвилі (λ) у DWDM-системі; DWDM дозволяє передавати десятки або сотні каналів (наприклад, 96 каналів у C-діапазоні за стандартом ITU-T G.694.1);

- гнучка сітка (Flex-Grid) – сучасні DWDM системи підтримують гнучку спектральну сітку (наприклад, 6.25 ГГц замість фіксованих 50 ГГц), що дозволяє ефективніше використовувати спектр для каналів OTN зі швидкостями 400G/800G;

- ROADM для гнучкості – ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers) у DWDM системах дозволяють динамічно додавати або видаляти OTN канали без фізичного втручання (це особливо важливо для магістральних мереж);

- когерентна передача – сучасні OTN/DWDM системи використовують когерентні модуляції (наприклад, 16QAM) і цифрову обробку сигналів (DSP) для підвищення спектральної ефективності та передачі на відстані до 2000+ км без регенерації сигналу;

- підсилення та компенсація – EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifiers) і Raman-підсилювачі (див. розділи 4.3 та 4.4) в DWDM системах забезпечують достатню потужність сигналу для OTN каналів, а компенсація хроматичної та поляризаційної дисперсії вбудована в обладнання для забезпечення якості сигналу.

Отже, OTN застосовується в першу чергу:

- на магістральних мережах операторів зв'язку (OTN дозволяє об'єднувати різнорідний трафік (Ethernet, SDH, IP) у єдиний канал, що спрощує управління магістральними мережами великих операторів.);

- для з'єднання ЦОД (Центри Обробки Даних) між собою - міждатацентрові з'єднання DCI – Data Centre Interconnect (OTN широко використовується для забезпечення високошвидкісних і надійних з'єднань між

центрами обробки даних і передачі великих обсягів даних між ЦОД у різних локаціях зі швидкістю 400G/800G через когерентну передачу);

- передачі 5G Fronthaul і Backhaul (OTN забезпечує низьку затримку та високу пропускну здатність для 5G-мереж, зокрема для транспортування eCPRI-трафіку між базовими станціями та ядром мережі) – цей пункт більше стосується побудови та експлуатації мереж мобільних операторів (операторів сотового зв'язку) та не є предметом цього посібника;

- хмарних сервісів та потокового відео (OTN оптимізує передачу потокового відео, наприклад, 8K-стрімінг, і хмарних додатків, забезпечуючи стабільність і якість сигналу).

На рис. 6.11. показана схема організації каналу зі швидкістю 400 Гбіт/с за допомогою обладнання Ciena 6500 Packet-Optical Platform.

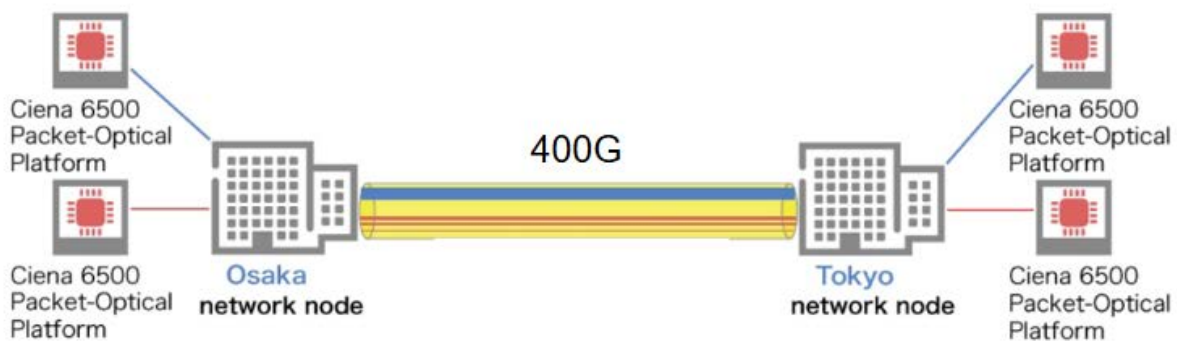


Рис. 6.11. Схема організації каналу зі швидкістю 400 Гбіт/с за допомогою обладнання Ciena 6500 Packet-Optical Platform

6.4. Основний стандарт OTN: ITU-T G.709

Як нам вже відомо, оптична транспортна мережа (OTN) базується на міжнародних стандартах, визначених Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU-T), а рекомендація ITU-T G.709 («Interfaces for the Optical Transport Network») є ключовим стандартом для оптичних транспортних мереж (OTN). Вона визначає структуру, формати кадрів, ієрархію мультиплексування, механізми корекції помилок та моніторингу для OTN. Станом на 2025 рік стандарт регулярно оновлюється, щоб підтримувати зростаючі швидкості (наприклад, 400G, 800G) і нові технології, такі як Flex-Grid.

Нижче наведені основні компоненти стандарту G.709 і їх функціональність.

Загальна мета стандарту G.709 полягає в тому, щоб стандартизувати інтерфейси OTN для передачі різноманітного клієнтського трафіку (Ethernet, SDH/SONET, Fiber Channel, відео тощо) через оптичні мережі та забезпечити високу пропускну здатність, надійність та керованість. Це дозволить

використовувати обладнання різних виробників на різних сегментах мережі. Стандартизація також дозволяє організувати інтеграцію з DWDM для ефективного використання оптичного спектра, підтримки моніторингу якості сигналу та корекції помилок. Ієрархічна структура OTN і її основні компоненти показані на рис. 6.12.

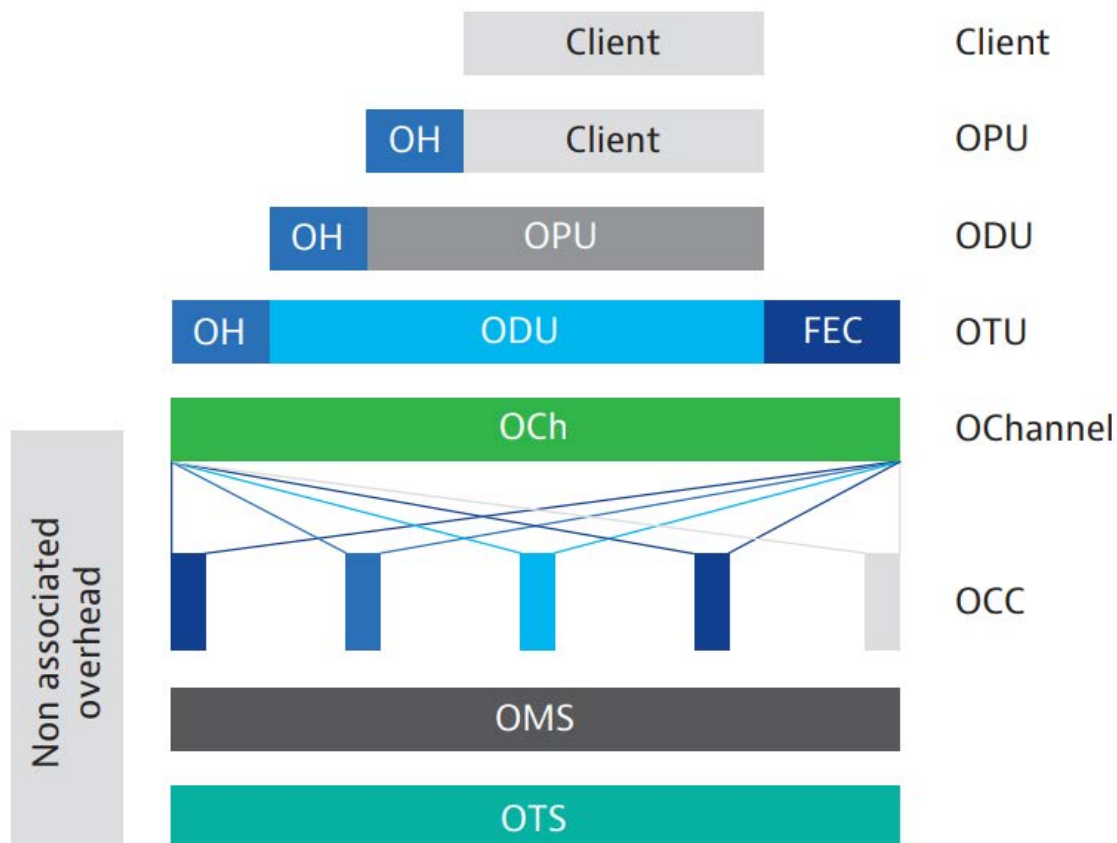


Рис. 6.12. Ієрархічна структура OTN і її основні компоненти.

Ієрархічна структура OTN і її основні елементи, які прописані в G.709 використовується для організації даних включають ODU (Optical Data Unit), OTU (Optical Transport Unit), OCh (Optical Channel) та OMS/OTS (Optical Multiplex Section/Optical Transmission Section).

ODU (Optical Data Unit) структура та швидкості показані на рис. 6.13. ODU – це контейнер для клієнтських даних, який включає корисне навантаження та заголовки для керування і складається з таких рівнів ODU: ODU0 (1.25 Гбіт/с), ODU1 (2.5 Гбіт/с), ODU2 (10 Гбіт/с), ODU3 (40 Гбіт/с), ODU4 (100 Гбіт/с), ODUflex (гнучка швидкість). ODUflex дозволяє налаштувати пропускну здатність під конкретний клієнтський сигнал (наприклад, 3.2 Гбіт/с для нестандартного трафіку). Заголовок ODU містить інформацію для мультиплексування, моніторингу (TCM) і керування.

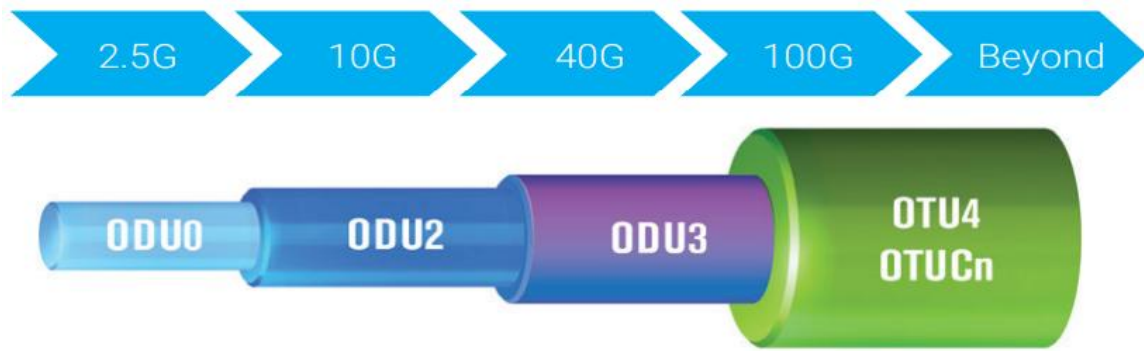


Рис. 6.13. Рівні ODU (Optical Data Unit) та швидкості.

OTU (Optical Transport Unit) додає до ODU механізми корекції помилок (FEC) і додаткові заголовки для передачі через оптичний канал. Рівні OTU: OTU1 (2.7 Гбіт/с), OTU2 (10.7 Гбіт/с), OTU3 (43 Гбіт/с), OTU4 (112 Гбіт/с). Для швидкостей понад 100G використовується OTUCn ($n \times 100G$, наприклад, OTUC4 = 400G).

OCh (Optical Channel) відповідає за передачу OTU через одну довжину хвилі в DWDM-системі. OCh включає фізичний оптичний сигнал і пов'язані з ним параметри (наприклад, модуляцію).

OMS/OTS (Optical Multiplex Section/Optical Transmission Section) – це секція для мультиплексованих каналів у DWDM, а OTS – це фізична передача по волокну, включаючи підсилювачі та компенсацію дисперсії.

Структура кадру OTN.

Кадр OTN відповідно до рекомендації G.709 має фіксовану структуру розміром 4 рядки \times 4080 стовпців (загалом 16 320 байтів). Приклад структури кадру OTN наведений на рис. 6.14.

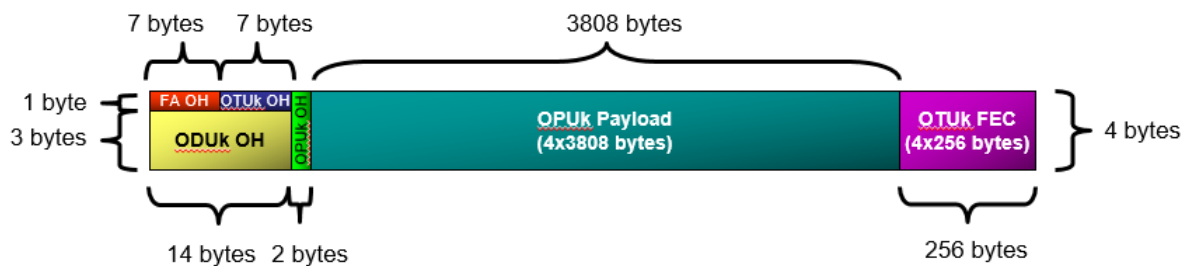


Рис. 6.14. Структура оптичного каналу, що складається з байтів ОН, клієнта та FEC.

Кадр OTN поділяється на кілька частин:

- заголовок (Overhead):
- рядок 1, стовпці 1-14: заголовки OTU і ODU;
- рядки 2-4, стовпці 1-14: заголовки ODU, включаючи TCM (Tandem Connection Monitoring);

- основні поля: SM (Section Monitoring): моніторинг помилок на рівні OTU (BIP-8, BEI – Bit Interleaved Parity): виявлення помилок у секціях і шляхах); TCM1-TCM6 (Tandem Connection Monitoring -): дозволяє моніторити до 6 незалежних сегментів мережі, що корисно для багаторівневих операторських мереж; AIS (Alarm Indication Signal): сигналізує про збої в мережі; PM (Path Monitoring): моніторинг кінцевих точок ODU; BDI (Backward Defect Indication): повідомляє про проблеми у зворотному напрямку; GCC/GCC0/GCC1/GCC2 (General Communication Channel): канали зв'язку для передачі керуючої інформації та сигналізації; RES (Reserved): зарезервовані байти для майбутніх розширень;

- корисне навантаження (Payload): стовпці 15-3824: Містять клієнтські дані, упаковані в ODU; підтримує мапування різних сигналів (наприклад, 10G Ethernet у ODU2 або STM-256 у ODU3);

- FEC (Forward Error Correction): стовпці 3825-4080: Використовуються для корекції помилок; стандартний FEC у G.709 базується на коді Ріда-Соломона (RS-255,239), який може виправляти до 8 помилок у блоці; для високошвидкісних систем (400G+) використовуються вдосконалені FEC, такі як SD-FEC (Soft-Decision FEC), для кращої ефективності на великих відстанях.

Згідно з стандартом G.709 підтримується два типи мультиплексування для об'єднання кількох ODU в один високошвидкісний канал – це часове мультиплексування та мультиплексування за довжиною хвилі.

Часове мультиплексування (TDM): низькошвидкісні ODU мультиплексуються в один ODU вищого рівня. Наприклад, $10 \times$ ODU2 зі швидкістю 10 Гбіт/с мультиплексуються в ODU4 зі швидкістю 100 Гбіт/с, SDH/SONET рівень STM-16 у ODU1, рівень STM-64 у ODU2, рівень STM-256 у ODU3; відео у ODUFlex призначений для нестандартних швидкостей. Мапування – це процес інкапсуляції клієнтського сигналу (наприклад, Ethernet, SDH, Fibre Channel) у структуру кадру OTN. Фактично мапування можна назвати процесом розміщення клієнтського сигналу у структуру кадру OTN. Він включає визначення формату розміщення даних у кадрі OPUk (Optical Payload Unit), синхронізацію та вирівнювання сигналу та додавання службової інформації (наприклад, для моніторингу або корекції помилок).

Мапування виконується за допомогою GMP (Generic Mapping Procedure), AMP (Asynchronous Mapping Procedure) або BMP (Bit-Synchronous Mapping Procedure), залежно від типу сигналу.

GMP (Generic Mapping Procedure) – забезпечує гнучке мапування клієнтських сигналів з різною швидкістю, підтримує асинхронні та синхронні потоки, дозволяє оптимізувати використання ресурсу OPUk, зменшуючи втрати.

AMP (Asynchronous Mapping Procedure) - використовується тоді, коли клієнтський сигнал має асинхронне співвідношення з транспортним контейнером OTN (наприклад, OPUk). Це означає, що: частота клієнтського сигналу близька, але не синхронізована з частотою OPUk, або для компенсації

різниці у швидкості використовуються байти виправлення (justification bytes). АМР дозволяє гнучко інтегрувати СВР-сигнали (Constant Bit Rate), які не мають жорсткої синхронізації з транспортною мережею.

ВМР (Bit-Synchronous Mapping Procedure) застосовується, коли клієнтський сигнал має синхронну бітову швидкість з ОРУк. А саме: частота ОРУк виводиться безпосередньо з клієнтського сигналу або немає потреби у байтах виправлення (мапування виконується без компенсації швидкості). ВМР забезпечує мінімальний джитер при демапуванні, що важливо для чутливих до затримки сервісів.

Ці процедури – як різні режими пакування даних залежно від того, наскільки точно вони «вписуються» у транспортний контейнер.

Мультиплексування за довжиною хвилі (WDM): кілька OTU передаються через різні довжини хвиль у DWDM системі. Стандарт G.709 інтегрується з ІТУ-Т G.694.1, який визначає спектральну сітку з кроком 50 ГГц, 100 ГГц або Flex-Grid.

Як і будь який стандарт, G.709 не стоїть на місці, а постійно розвивається і доповнюється, так як виробники в тісній співпраці з ІТУ-Т постійно працюють над його вдосконаленням та відповідності сучасним потребам. Останні оновлення G.709 (станом на 2025 рік) включають наступні доповнення:

- OTUCn: підтримка швидкостей понад 100G (наприклад, 400G, 800G) шляхом об'єднання кількох OTU4;

- Flex-Grid: інтеграція з гнучкими спектральними сітками для DWDM;

- SD-FEC: вдосконалені алгоритми корекції помилок для когерентних систем;

- підтримка 5G: оптимізація для низької затримки та високої пропускної здатності в мережах 5G (наприклад, для fronthaul).

6.5. Переваги OTN: корекція помилок, моніторинг з'єднань, масштабованість.

Оптична транспортна мережа (OTN) має низку технічних переваг, які роблять її ідеальним рішенням для сучасних високошвидкісних мереж передачі даних. Вона забезпечує захист інформації, оптимальне використання ресурсів та гнучку масштабованість для операторів та дата-центрів.

Корекція помилок (FEC – Forward Error Correction).

OTN має вбудований механізм корекції помилок, який дозволяє мінімізувати вплив шуму та втрат сигналу при передачі даних. Це досягається за допомогою технології FEC (Forward Error Correction), яка:

- Автоматично виправляє помилки, що виникають через оптичні спотворення.

- Забезпечує надійність зв'язку, навіть при великих відстанях.

- Підвищує якість обслуговування (QoS) за рахунок точного відновлення даних.

Завдяки FEC, OTN забезпечує стабільне передавання великих обсягів даних без втрат, що є критично важливим для операторів зв'язку та мереж корпоративного рівня. Як приклад можна навести наступне: FEC у OTN може зменшити бітову помилку (BER) з 10^{-6} до 10^{-12} , що критично для передачі на відстані 2000+ км.

Моніторинг з'єднань та управління мережею.

OTN має вбудовану систему моніторингу та управління, яка дозволяє операторам:

- Контролювати якість зв'язку в реальному часі.
- Виявляти та діагностувати проблеми без фізичного доступу до оптичної лінії.
- Оптимізувати використання каналів для мінімізації затримок та втрат пакетів.

Ці можливості значно спрощують технічне обслуговування та знижують операційні витрати, оскільки немає потреби у фізичному втручанні для коригування з'єднання.

Масштабованість та адаптивність.

OTN підтримує широкий спектр швидкостей передачі даних, від 2,5 Гбіт/с до 100 Гбіт/с, а сучасні технології дозволяють гнучке масштабування до FlexO, що перевищує 400 Гбіт/с. Це дає переваги:

- Гнучкість розширення мережі без заміни базової інфраструктури.
- Оптимізацію ресурсів, дозволяючи ефективно розподіляти трафік.
- Підтримку нових сервісів, таких як 5G та хмарні платформи.

Масштабованість OTN робить її ідеальним рішенням для майбутніх телекомунікаційних мереж, що відповідають вимогам глобального росту даних.

Підсумовуючи інформацію по OTN можна зробити такий висновок, що універсальність (підтримка широкого спектру клієнтських сигналів); надійність (FEC і TCM забезпечують високу якість передачі); масштабованість (від 2,5 Гбіт/с до терабітних швидкостей); керованість (розширені інструменти моніторингу для діагностики мережі), роблять OTN однією з найнадійніших та ефективних технологій для передачі даних по волоконно-оптичних мережах. Технологія OTN гарантує стабільність, безперебійність та адаптивність мережі, що є критично важливим для сучасних телекомунікаційних операторів.

6.6. Аналіз майбутнього розвитку оптичної транспортної мережі (OTN).

Оптична транспортна мережа (OTN) є ключовою технологією для високошвидкісних телекомунікаційних магістралей, центрів обробки даних (ЦОД), 5G-мереж і хмарних сервісів. Вона базується на стандартах ITU-T (зокрема G.709), забезпечує гнучке мультиплексування, корекцію помилок (FEC), моніторинг і масштабованість. Враховуючи сучасні тенденції в

телекомунікаціях, нижче наведено аналіз перспектив розвитку OTN, ключові напрямки еволюції, виклики та потенційні застосування до 2030 року.

З урахуванням динаміки зростання пропускної здатності можна сміливо казати, що до 2030 року очікується комерціалізація каналів на 1,2-1,6 Тбіт/с на одну довжину хвилі завдяки новим модуляціям (наприклад, 128QAM, 256QAM) і багатосмуговій передачі (C+L-діапазони, а в перспективі S та E-діапазони). Також прогнозується збільшення кількості каналів завдяки використанню Flex-Grid (6.25 ТГц) і вдосконаленню механізму WSS (Wavelength Selective Switch), які дозволять передавати 200+ каналів у C+L-діапазонах, щоб забезпечити пропускну здатність по одному волокну на рівні 100+ Тбіт/с.

Також буде поглиблюватись інтеграція OTN та DWDM за рахунок розширення спектрального діапазону DWDM (Super-C до 6.6 ТГц, C+L до 12 ТГц), що дозволить збільшити кількість каналів і пропускну здатність і призведе до більшої адаптації OTN до цих діапазонів через оновлення стандартів G.694.1. Впровадження CDC-F ROADM (Colorless, Directionless, Contentionless, Flexible) може стати стандартом та призведе до покращення ROADM з підтримкою автоматичного керування через SDN для динамічного розподілу каналів. Використання WSS з підтримкою 3D-комутації забезпечать маршрутизацію в мережах зі складною топологією (mesh). Слід очікувати, що оптична маршрутизація отримає «друге дихання» та подальший розвиток - ОХС (Optical Cross-Connect) у поєднанні з OTN дозволить створювати повністю оптичні мережі з мінімальними електричними перетвореннями, знижуючи затримки та енергоспоживання.

Використання адаптивних модуляцій (наприклад, гібридних QAM або PCS – Probabilistic Constellation Shaping) дозволить оптимізувати пропускну здатність залежно від відстані та умов каналу. Використання квантових підсилювачів замість EDFA і Raman-підсилювачів дозволить зменшити вплив шуму в оптичних мережах та підвищити OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio). Вплив шуму особливо критичен для каналів зі швидкістю 1+ Тбіт/с.

SDN і NFV (Network Function Virtualization) дозволять створювати програмно-керовані OTN-мережі, де ресурси (канали, пропускну здатність, маршрути) під керуванням штучного інтелекту (AI) будуть розподілятися в реальному часі і призведуть до появи мережевих оркестраторів – уніфікованих платформ керування без людського втручання. Що в свою чергу призведе до зниження операційних витрат на експлуатацію та технічну підтримку мережі.

Майбутнє OTN виглядає перспективним завдяки її здатності адаптуватися до зростаючих потреб у пропускну здатності, надійності та гнучкості. Ключові напрямки розвитку включають:

- Терабітні канали та багатосмугові DWDM-системи.
- Поглиблена автоматизація через SDN/AI.
- Удосконалення когерентної передачі та FEC для далеких відстаней.
- Енергоефективні рішення для сталого розвитку.

OTN залишатиметься основою для магістральних мереж, ЦОД, 6G, але потребуватиме подолання технічних (нелінійності, шум) і економічних (висока вартість) викликів. Глобально, OTN має потенціал стати основою для мереж майбутнього, підтримуючи найновіші хмарні сервіси, IoT тощо до 2030 року і далі.

6.7. Використання OTN (Optical Transport Network) для підвищення ефективності віртуалізації в мережах ЗВО.

Волоконно-оптичні мережі є основою сучасних телекомунікаційних систем, особливо в мережах вищих навчальних закладів (ЗВО), де зростають потреби в пропускній здатності, гнучкості, надійності та безпеці даних. У контексті цифрової трансформації освіти віртуалізація мережевих ресурсів стала невід'ємною частиною інфраструктури, дозволяючи централізувати обчислення, зберігання даних і управління. Технологія Optical Transport Network (OTN) є потужним інструментом для інтеграції з віртуалізованими середовищами.

OTN є оптичною транспортною мережею, розробленою для ефективної передачі даних через оптоволоконні канали з високою пропускну здатністю та низькою затримкою часу при передачі інформації. Її архітектура, визначена стандартом ITU-T G.709, базується на трьох основних рівнях: OPU (Optical Payload Unit), ODU (Optical Data Unit) і OTU (Optical Transport Unit). OPU адаптує клієнтські сигнали, такі як Ethernet, SDH, IP або навіть сучасні протоколи 5G, до формату OTN, забезпечуючи їх сумісність із оптичною інфраструктурою. ODU виконує мультиплексування та комутацію цих сигналів, дозволяючи гнучке розподілення пропускну здатності між різними типами трафіку. OTU додає службову інформацію, включаючи механізми корекції помилок (FEC – Forward Error Correction), які підвищують надійність передачі, компенсуючи ефекти шуму та інтерференції.

Ця трирівнева структура дозволяє OTN інтегруватися з технологією DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), що підтримує передачу десятки каналів з різними довжинами хвиль по одному або по парі волокон. Інтеграція з DWDM розширює можливості OTN, дозволяючи передавати дані на швидкостях від 2.5 Гбіт/с (OTU1) до 400 Гбіт/с (OTU4) і вище, що відповідає сучасним вимогам до мереж. Така гнучкість дозволяє OTN адаптуватися до різноманітних сценаріїв використання, включаючи підтримку віртуалізованих сервісів у ЗВО. Графік порівняння пропускну здатності традиційної мережі Ethernet з OTN з DWDM при однаковій кількості волокон наведений на рис. 6.15.

ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ ПРИ ОДНАКОВІЙ КІЛЬКОСТІ ВОЛОКОН

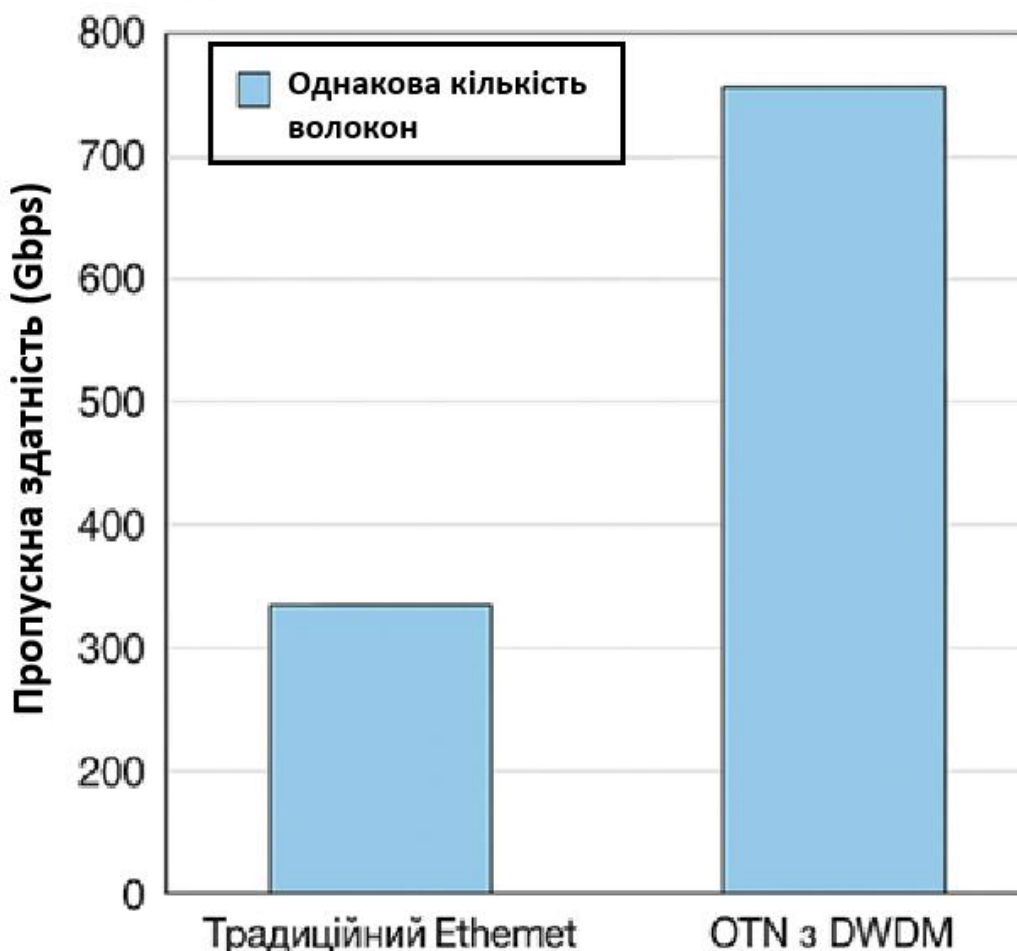


Рис. 6.15. Графік порівняння пропускної здатності традиційної мережі Ethernet з OTN з DWDM при однаковій кількості волокон.

Віртуалізація мережевих ресурсів у ЗВО, таких як віртуальні класи, хмарні лабораторії, платформи для віддаленого навчання та сховища наукових даних, стають ключовим елементом цифрової освіти. Ці платформи вимагають високої пропускної здатності для обробки великих обсягів даних (відео, моделювання, обчислення), низької затримки часу для забезпечення плавної роботи в режимі реального часу та гнучкого розподілу ресурсів між студентами, викладачами та дослідницькими групами. Затримка часу при передачі даних від джерела до отримувача, є критичним фактором. У контексті віртуалізації, наприклад, під час відеоконференцій, онлайн-лабораторій чи віддалених обчислень, навіть мілісекундні затримки можуть негативно вплинути на якість навчання, викликаючи розриви зв'язку, затримки в реакції систем або втрату синхронізації.

Ключовими потребами є підтримка трафіку на рівнях 10G, 100G і вище, забезпечення якості обслуговування (QoS) для критичних додатків, таких як відеоконференції, онлайн-тестування, передача великих наукових даних чи потокове мовлення лекцій, а також захист від збоїв і кібератак. Традиційні мережі, побудовані на базі Ethernet чи SDH (дедалі рідше зустрічаються), часто стикаються з обмеженнями в масштабовності, затримками часу та захисті, особливо в розподілених кампусах навчальних закладів. OTN вирішує ці проблеми завдяки централізованому управлінню, високій пропускну здатності, механізмам резервування та інтеграції з сучасними технологіями безпеки, що забезпечує стабільність і надійність навіть у пікові навантаження.

OTN має низку переваг, які роблять її незамінною для систем віртуалізації в мережах ЗВО. В першу чергу це висока пропускну здатність і масштабованість. OTN підтримує мультиплексування великої кількості каналів, що дозволяє ЗВО розширювати мережу без значних капітальних витрат на кабельну або апаратну частину інфраструктури. Ця здатність ідеально підходить для підтримки тисяч віртуальних машин, які можуть одночасно використовуватись студентами та викладачами під час лекцій, іспитів, досліджень чи масових онлайн-курсів. Як приклад можна навести наступне: у період активного використання онлайн-курсів, до кількох тисяч студентів одночасно можуть переглядати лекції з високою роздільною здатністю. Ethernet-мережа створює вузькі місця, тоді як OTN в поєднанні із DWDM справляється з навантаженням без деградації потоку.

По-друге, ефективне управління трафіком. OTN здатна адаптувати клієнтські сигнали (Ethernet, SDH, IP) до своєї структури. Це дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів, наприклад, виділяючи більше пропускну здатності для відеотрафіку під час лекцій, тестувань чи вебінарів, а в інший час перерозподіляючи пропускну здатність для наукових обчислень або резервного копіювання даних.

По-третє, механізми FEC зменшують втрати даних і прискорюють передачу (рис. 6.16.), що є критично важливим для додатків у реальному часі, таких як відеозв'язок, онлайн-лабораторії, інтерактивні семінари чи ігрові симуляції в освітніх цілях.

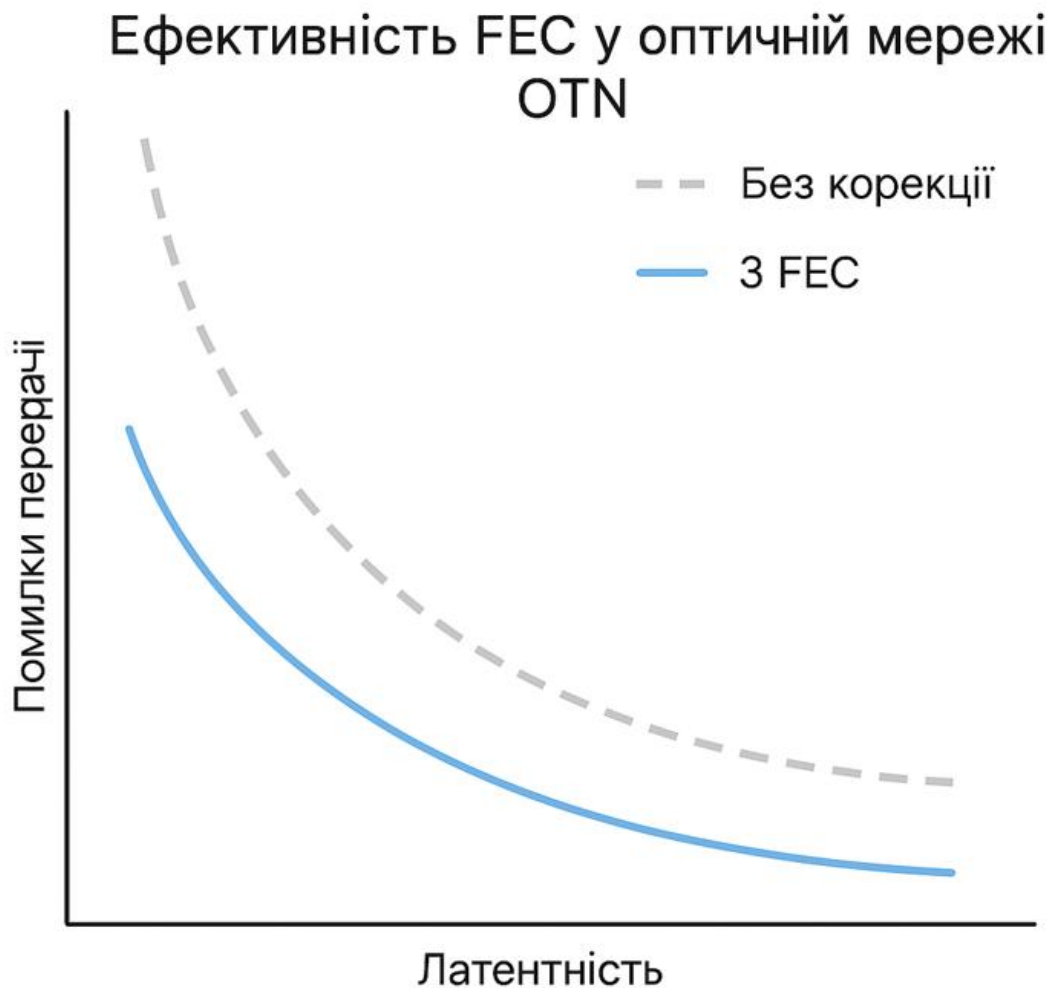


Рис. 6.16. Графік ефективності FEC у оптичній мережі OTN – як FEC знижує помилки передачі та латентність у порівнянні зі стандартною схемою без корекції.

По-четверте, віртуалізація зменшує споживання енергії через консолідацію серверів, а OTN додатково оптимізує використання оптичних ресурсів, знижуючи експлуатаційні витрати, що є важливим для бюджетних обмежень навчальних закладів, особливо в умовах зростання цін на електроенергію.

По-п'яте, OTN підтримує кільцеві топології та механізми захисту, які гарантують безперервність роботи навіть у разі пошкодження волокна, що є важливим для критичних освітніх сервісів, таких як іспити, консультації чи доступ до бібліотечних ресурсів.

Впровадження OTN у волоконно-оптичній мережі ЗВО вимагає ретельного планування та етапного підходу. Перший етап передбачає оцінку наявної інфраструктури: кількості оптоволоконних ліній, стану обладнання, обсягів трафіку та поточних потреб користувачів. Для ЗВО з територіально-розподіленою інфраструктурою, що включає кілька кампусів (наприклад, головний корпус, філії та гуртожитки), доцільно організувати кільцеву

топологію OTN, яка з'єднує всі локації з центральним вузлом для централізованого управління, моніторингу та резервування.

Приклад впровадження: Університет із трьома кампусами (А, В, С), розкиданими на різні відстані один від одного (до умовної філії від центрального кампусу чи дослідницького центру може бути до 20-30 км), може використовувати OTN для інтеграції з хмарною платформою, що підтримує віртуальні лабораторії, класи, сховища даних і відеоконференції. У якості основного елементу мережі OTN пропонується використати 5U шасі MU-380-ACDC від компанії DWDM.ME, яке забезпечує підтримку швидкостей до 400 Гбіт/с і динамічне управління трафіком. Кільцева топологія з'єднує кампуси через оптоволоконні кабелі, а OTN-комутатори MU-70-ACDC (рис. 6.17.) розподіляють трафік між віртуальними сервісами, забезпечуючи гнучке переключення між різними типами навантаження (лекції, тести, дослідження).

Для підвищення гнучкості можна інтегрувати OTN із SDN (програмно-керована мережа). Ця технологія дозволяє адміністраторам динамічно налаштовувати мережу, наприклад, підвищуючи пропускну здатність та перерозподіляти ресурси для наукових обчислень у навчальний та позанавчальний час. SDN також забезпечує автоматизацію управління, що зменшує навантаження на персонал, підвищує ефективність і дозволяє адаптуватися до неочікуваних піків навантаження, таких як масові онлайн-курси чи вебінари з відомими лекторами.

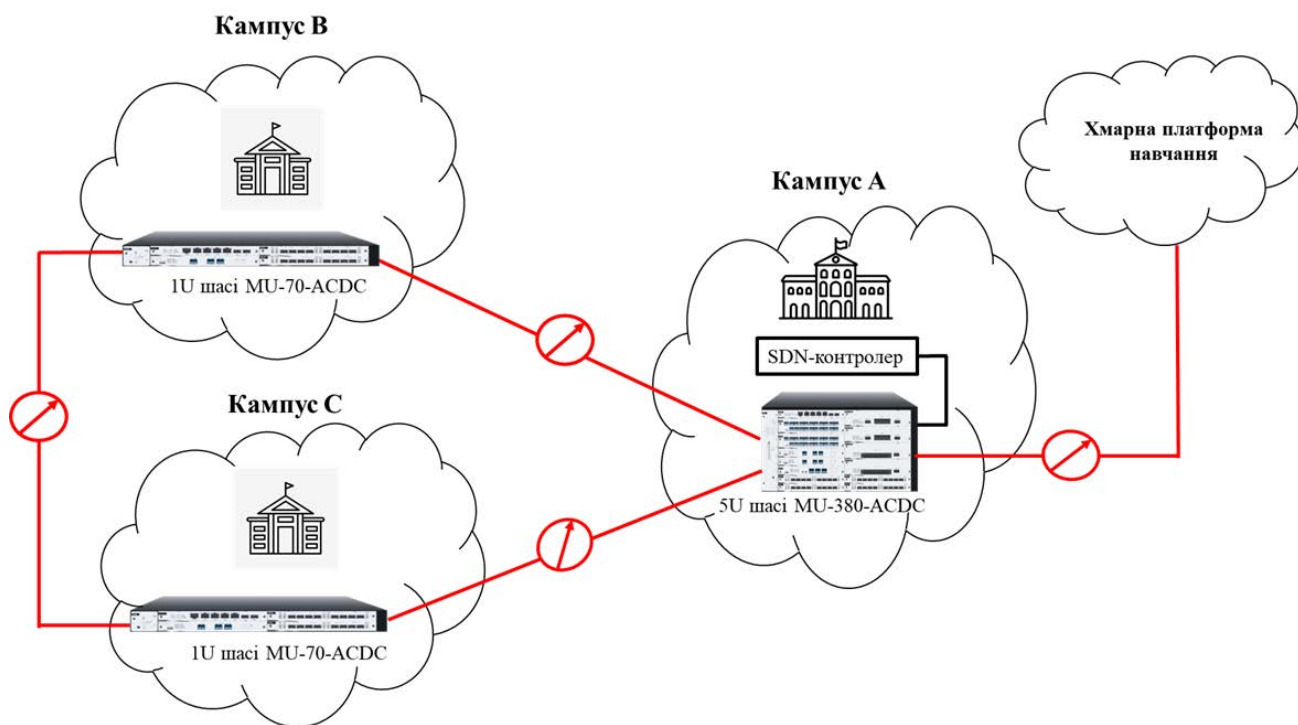


Рис. 6.17. Схема побудови OTN-мережі Університету із трьома кампусами.

Технічна реалізація OTN включає використання підсилювачів (EDFA), компенсаторів дисперсії (DCM), які стабілізують сигнал на великих відстанях

(але це за умови дійсно великих відстаней між структурними підрозділами та використання власної кабельної інфраструктури). Моніторинг OSNR (оптичне співвідношення сигнал/шум) у реальному часі дозволяє підтримувати якість передачі, виявляти деградацію сигналу та приймати превентивні заходи. Регулярна оцінка стану волокон за допомогою оптичних рефлектометрів (OTDR) забезпечує виявлення пошкоджень, перегинів чи втрат, що є критично важливим для безперервної роботи віртуалізованих сервісів, таких як онлайн-лекції, доступ до хмарних ресурсів чи резервне копіювання даних.

Недивлячись на численні переваги, впровадження OTN пов'язане з певними викликами. Основними є фінансові витрати на закупівлю обладнання, а також підготовку персоналу для його експлуатації. Інтеграція OTN із існуючими мережами, може бути ускладнена через відмінності в архітектурі, протоколах і сумісності обладнання. Крім того, необхідність регулярного моніторингу OSNR, потужності сигналу та стану волокон вимагає додаткових ресурсів, кваліфікованого персоналу та програмного забезпечення.

Перспективи розвитку OTN включають інтеграцію з майбутніми 6G мережами, які обіцяють швидкості до 1 Тбіт/с, латентність менше 1 мс і підтримку масового Інтернету речей (IoT) у навчальному процесі. Використання штучного інтелекту для прогнозування навантаження на мережу дозволить оптимізувати розподіл ресурсів у реальному часі, адаптуючись до пікових навантажень, таких як початок семестру, іспитовий період чи масові онлайн-заходи. Інтеграція OTN із технологіями доповненої реальності (AR) і віртуальної реальності (VR) відкриє нові можливості для інтерактивного навчання, симуляцій і наукових експериментів, роблячи OTN основою для наступного покоління освітніх інфраструктур.

Як висновок, OTN забезпечує ефективну підтримку віртуалізації в мережах ЗВО, підвищуючи масштабованість, надійність і якість обслуговування. Її інтеграція з DWDM і SDN сприяє цифровій трансформації освіти, дозволяючи адаптуватися до зростаючих потреб студентів, викладачів і дослідників. З правильним підходом до планування, фінансування, експлуатації та навчання персоналу OTN стане ключовим елементом інфраструктури ЗВО, підтримуючи інноваційні освітні платформи, такі як віртуальні лабораторії, хмарні класи та віддалені наукові центри, у майбутньому.

Використана література для написання розділу [3, 6, 15, 23, 26, 31, 33, 35, 36, 38, 39, 42, 43, 44, 60, 61, 65, 66, 67, 84, 85, 86].

Загальні питання для самоконтролю до розділу

- Що таке оптична транспортна мережа (OTN), і які її основні переваги порівняно з іншими технологіями, такими як SDH/SONET чи MPLS?
- Як ієрархічна структура OTN (ODU, OTU, OCh) забезпечує ефективне мультиплексування різних типів клієнтських даних?
- Яку роль відіграє механізм FEC (Forward Error Correction) у підвищенні надійності передачі даних в OTN, і як він компенсує втрати сигналу?

- Що таке гнучка сітка (Flex-Grid), і як вона підвищує ефективність використання оптичного спектра в OTN/DWDM-мережах?
- Як технологія DWDM інтегрується з OTN, і яку роль відіграють ROADMs у забезпеченні гнучкості мережі?
- Що таке когерентна передача, і як складні модуляції (наприклад, DP-QPSK, 16QAM) сприяють підвищенню пропускної здатності в OTN?
- Які основні функції стандарту ITU-T G.709, і як структура кадру OTN підтримує передачу та моніторинг даних?
- Як моніторинг з'єднань (наприклад, TCM, BIP-8) у OTN допомагає операторам виявляти та усувати несправності в мережі?
- Які ключові напрямки розвитку OTN до 2030 року, і як впровадження SDN та AI може змінити керування мережами?
- Чому масштабованість OTN є критично важливою для сучасних застосувань, таких як 5G, міждатацентрові з'єднання (DCI) та хмарні сервіси?

7. Захист інформації на лінійно-кабельних спорудах волоконно-оптичних мереж.

7.1. Особливості передачі даних через ВОЛЗ та актуальність питань інформаційної безпеки в оптичних мережах.

Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) є сучасним стандартом високошвидкісної та надійної передачі даних. Принцип передачі інформації через оптичне волокно базується на явищі повного внутрішнього відбиття світлового сигналу всередині скляного або полімерного волокна. Світло поширюється через серцевину оптичного волокна, багаторазово відбиваючись від межі з оболонкою, що має менший показник заломлення.

На відміну від систем зв'язку, що використовують мідні провідники, ВОЛЗ мають низку принципових відмінностей з точки зору інформаційної безпеки:

- відсутність електромагнітного випромінювання, що робить неможливим безконтактне перехоплення даних традиційними засобами електромагнітної розвідки;

- висока стійкість до електромагнітних перешкод, що забезпечує захист від зовнішніх спроб заглушення сигналу;

- складність фізичного доступу до оптичного середовища передачі, особливо для підземних і підводних кабелів;

- можливість швидкого виявлення фактів фізичного втручання завдяки високій чутливості параметрів оптичного сигналу до змін характеристик волокна;

- Проте, попри загальноприйняту думку про підвищену захищеність ВОЛЗ, вони мають специфічні вразливості:

- можливість відгалуження оптичного сигналу без руйнування волокна при використанні спеціальних методів;

- складність виявлення деяких типів неруйнівного доступу до оптичного волокна;

- значна залежність від цілісності фізичної інфраструктури;

- концентрація великих потоків інформації в одному фізичному середовищі, що підвищує цінність об'єкта для потенційного зловмисника.

Економічні наслідки порушення конфіденційності та цілісності даних в оптичних мережах є надзвичайно високими. Для комерційних організацій вартість витоку даних через перехоплення інформації в ВОЛЗ може сягати мільйонів доларів. Ще серйознішими є наслідки переривання зв'язку через фізичні пошкодження лінійних споруд. За оцінками експертів, втрати від години простою магістральної ВОЛЗ можуть складати від сотень тисяч до мільйонів доларів залежно від критичності обслуговуваних сервісів.

Критичність оптичних мереж для сучасної інформаційної інфраструктури постійно зростає. ВОЛЗ сьогодні забезпечують:

- Функціонування глобальної мережі Інтернет (через підводні міжконтинентальні кабелі)

- Зв'язок між центрами обробки даних і хмарними сервісами

- Роботу банківських і фінансових систем
- Керування критичною інфраструктурою (енергетика, транспорт, промисловість)
- Надання телекомунікаційних послуг населенню та бізнесу

Зростання кількості спроб несанкціонованого доступу до ВОЛЗ пов'язане із підвищенням цінності інформаційних активів і поширенням знань про методи втручання в роботу оптичних мереж. Зловмисники використовують як прості методи фізичного пошкодження для порушення доступності, так і складні технології перехоплення даних для отримання несанкціонованого доступу до цінної інформації.

7.2. Огляд потенційних загроз та вразливостей.

Загрози безпеці ВОЛЗ можна класифікувати за різними критеріями. За джерелом походження виділяють: природні загрози, техногенні загрози, загрози, пов'язані з людським фактором, ненавмисні загрози.

Природні загрози:

- стихійні лиха (повені, землетруси, зсуви ґрунту);
- екстремальні погодні умови (грози, урагани, сильні снігопади);
- температурні впливи (заморожування/перегрівання кабелю);
- пошкодження тваринами (гризуни, птахи, комахи).

Техногенні загрози:

- аварії на інших комунікаціях (газопроводи, водопроводи);
- Будівельні роботи з пошкодженням кабелю;
- Електромагнітні впливи від високовольтних ліній;
- Дефекти обладнання та матеріалів.

Загрози, пов'язані з людським фактором:

- ненавмисні помилки персоналу при обслуговуванні ВОЛЗ;
- неправильне налаштування обладнання;
- недотримання технологічних процесів монтажу;
- некоректне документування інфраструктури.

Навмисні загрози:

- цілеспрямоване фізичне пошкодження кабелів та обладнання;
- несанкціоноване підключення для перехоплення інформації;
- атаки на системи моніторингу та управління ВОЛЗ;
- соціальна інженерія для отримання доступу до об'єктів інфраструктури ВОЛЗ.

Відповідно за цілями впливу загрози можна розподілити на такі, що спрямовані на порушення:

- *Конфіденційності* – перехоплення інформації без порушення процесу її передачі.
- *Цілісності* – модифікація даних, що передаються через ВОЛЗ.
- *Доступності* – припинення або деградація послуг передачі даних.

Якщо розглядати оптичну мережу в цілому, то вразливими елементами її лінійних споруд є:

- *оптичні муфти* – місця з'єднання кабелів, що часто розташовуються в доступних місцях;

- *оптичні кроси та бокси* – пристрої комутації оптичних волокон в будівлях;

- *регенераційні пункти* – місця встановлення проміжного обладнання для відновлення сигналу;

- *кабельні колодязі* – точки доступу до підземної кабельної каналізації;

- *наземні розподільчі шафи* – обладнання для розгалуження абонентських ліній;

- *місця відкритого прокладання кабелю* – ділянки, де кабель візуально доступний.

7.3. Пасивні методи несанкціонованого доступу.

Пасивні методи несанкціонованого доступу до інформації у волоконно-оптичних лініях в першу чергу спрямовані на перехоплення даних без суттєвих змін параметрів оптичного сигналу, що ускладнює виявлення таких втручань. До основних методів можна віднести наступні:

Безконтактні методи відгалуження оптичного сигналу - метод мікровигинів волокна та перехоплення через розсіювання на неоднорідностях.

Метод мікровигинів волокна – передбачає створення контрольованих деформацій оптичного волокна, при яких частина світлової енергії випромінюється через оболонку. Для реалізації використовуються спеціальні пристрої (мікровигинні відгалужувачі), що створюють серію малих вигинів з визначеною просторовою частотою. Ефективність такого методу залежить від типу волокна, довжини хвилі сигналу та якості пристрою відгалуження. При професійному виконанні можливе перехоплення до 1-5% потужності сигналу, що достатньо для аналізу інформації, але недостатньо для надійного виявлення системами моніторингу потужності.

Перехоплення через розсіювання на неоднорідностях – використовує ефекти розсіювання Релея та Рамана для отримання частини сигналу без порушення цілісності волокна. Зловмисник може використовувати спеціалізовані оптичні прилади, що вловлюють розсіяне випромінювання через оболонку волокна. Такий метод особливо ефективний на вигинах кабелю, з'єднаннях та зварних стиках, де розсіювання природно підвищене.

Контактні методи відгалуження - метод розриву волокна з подальшим встановленням відгалужувача, встановлення Y-подібних відгалужувачів на етапі монтажу.

Метод розриву волокна з подальшим встановленням відгалужувача – передбачає тимчасове переривання зв'язку для вставки оптичного розгалужувача. Цей метод потребує значних технічних навичок для швидкого відновлення зв'язку з мінімальними змінами параметрів лінії. Перевагою для

зловмисника є можливість отримання значної частини сигналу (до 20-50%), проте такий метод залишає характерні сліди на рефлектограмі та спричиняє тимчасове переривання зв'язку.

Встановлення Y-подібних відгалужувачів на етапі монтажу - найскладніший метод, що потребує доступу до ВОЛЗ під час будівництва або планового ремонту. При цьому в лінію інтегрується легітимний на вигляд розгалужувач, що відводить частину сигналу на приховане оптичне волокно для подальшого аналізу. Дуже часто такі пристрої можуть встановлюватись правоохоронними органами в технічних приміщеннях операторів та провайдерів.

Технології «прослуховування» оптичних волокон через оболонку - використання еванесцентного поля, використання V-подібних канавок.

Використання еванесцентного поля – метод базується на тому, що оптичне випромінювання в одномодовому волокні має компоненту, що виходить за межі серцевини (еванесцентне поле). Шляхом видалення частини оболонки та нанесення спеціального гелю з відповідним показником заломлення, можна «витягнути» частину сигналу без значного збільшення згасання на лінії.

Використання V-подібних канавок – метод передбачає створення мікроскопічної V-подібної виїмки в оболонці волокна до частини серцевини для відведення невеликої частини сигналу.

Підвісні кабелі найбільш вразливі через відносну доступність і можливість маскування обладнання перехоплення під легітимне обслуговування ліній. Підземні кабелі потребують доступу через кабельні колодязі або створення несанкціонованих розкопок, що підвищує ризик виявлення. Підводні кабелі найбільш захищені від фізичного перехоплення через складність доступу, але вразливі в місцях виходу на берег.

7.4. Активні методи втручання в роботу ВОЛЗ.

Активні методи втручання в роботу волоконно-оптичних ліній зв'язку відрізняються від пасивних головним чином тим, що вони спрямовані не лише на отримання інформації, але й на зміну параметрів передачі даних або їх модифікацію. Такі методи зазвичай легше виявити, але вони можуть бути набагато небезпечнішими і мати за собою більш серйозні наслідки.

В першу чергу до активних методів слід віднести вплив на параметри оптичного сигналу - це внесення шуму, зміна поляризації сигналу або внесення фазових спотворень в сигнал, що передається.

Внесення шуму – передбачає введення в оптичне волокно додаткового випромінювання, яке створює перешкоди для легітимного сигналу. Для цього може використовуватися потужний лазер з довжиною хвилі, близькою до робочої. Внаслідок такого втручання знижується співвідношення сигнал/шум, збільшується кількість помилок при передачі даних, а в крайніх випадках зв'язок може бути повністю перерваний.

Зміна поляризації сигналу – метод, що використовується проти систем з поляризаційним мультиплексуванням. Шляхом механічного впливу на волокно (тиск, скручування) або за допомогою зовнішніх електромагнітних полів можна змінити стан поляризації світлового сигналу, що особливо критично для когерентних систем зв'язку.

Внесення фазових спотворень – актуально для систем з фазовою модуляцією. Зловмисник може використовувати п'єзоелектричні елементи для створення контрольованих мікрівібрацій волокна, що призводить до фазових спотворень сигналу.

Крім того до активних методів втручання в роботу оптичних мереж варто зазначити і ті, що пов'язані підміною інформації та «відмовами в обслуговуванні» на оптичних мережах.

До метода підміни передаваної інформації відносяться наступні методи: перехоплення з модифікацією та ретрансляцією, маніпуляції з протоколами верхніх рівнів, атаки на системи керування оптичними мережами.

Перехоплення з модифікацією та ретрансляцією – складний та затратний метод, що передбачає розрив оптичного волокна, встановлення проміжного пристрою, який перехоплює легітимний сигнал, модифікує дані і ретранслює їх далі. Такий метод може використовуватися для цільової підміни окремих пакетів даних або для масштабного втручання в інформаційний потік.

Маніпуляції з протоколами верхніх рівнів – атаки, спрямовані на вразливості в протоколах передачі даних, що працюють поверх оптичного транспорту. Наприклад, можливе втручання в роботу протоколів TCP/IP, BGP, OSPF через маніпуляцію службовим трафіком на рівні оптичної мережі.

Атаки на системи керування оптичними мережами – це впливи, спрямовані на компоненти систем керування оптичними мережами (Control Plane) для зміни маршрутизації оптичних каналів або маніпуляції з параметрами передачі.

Дуже часто провайдери в рамках недоброчесної конкуренції вдаються до фізичного пошкодження кабелів своїх конкурентів. Особливо це явище розповсюджене в колодязях кабельної каналізації та на повітряних лініях, коли кабель підвішено на опорах. Це призводить до припинення надання послуг (фізичним та юридичним абонентам). Або такі атаки можуть бути спрямовані на критичні вузли мережі для максимального впливу.

Але найбільшої шкоди за своїм впливом завдають комбіновані атаки з використанням як фізичного доступу, так і програмних засобів. Такі атаки завдають значних фінансових та репутаційних втрат компаніям, проти яких були направлені.

Фізичні загрози лінійним спорудам ВОЛЗ становлять значну частину всіх інцидентів безпеки оптичних мереж і призводять до найбільш помітних порушень їх функціонування.

В першу чергу це викрадення елементів інфраструктури – крадіжка кабелів, обладнання, металевих компонентів лінійних споруд. Хоча оптичне волокно саме по собі не має значної цінності як металобрухт (на відміну від

мідних кабелів), його пошкодження часто є побічним результатом спроб викрадення металевих елементів підвісу, захисної броні кабелю або обладнання. Одне з найроповсюдженіших пошкоджень кабельної оптичної інфраструктури саме перерізання оптичного кабелю з метою впевнитись що це оптичний кабель, а не мідний, бо мідний можна здати в пункти прийомки вторсировини. Хоча в Україні є випадки викрадення оптичного кабелю, з волокон якого роблять новорічні прикраси.

Окремо слід згадати диверсії – стратегічно сплановані пошкодження ключових елементів інфраструктури ВОЛЗ з метою порушення роботи важливих об'єктів або систем. Такі дії можуть бути елементом гібридних конфліктів або терористичних актів. Варто згадати пошкодження волоконно-оптичної інфраструктури, ключової для всіх екстрених служб міста та у Варшавському метро у в ніч на 1 липня 2025 року. Варшавському метрополітені сталася пожежа. Займання виникло в технічному приміщенні під станцією Радславіцька на лінії М1. Через пожежу виник транспортний колапс у місті. Але саме головне залишилось поза увагою преси і дуже довго обговорювалось телеком-спільнотою України. Пожежа пошкодила кабельний колектор, в якому були прокладені магістарльні оптичні кабелі, і в результаті половина каналів у деяких операторів та провайдерів України просто зникла. Чому? Тому що в Варшаві розташований один з великих дата-центрів, в який були включені українські провайдери. Аналогічні інциденти були і в Україні незадовго до повномасштабного нападу росії в 2022 р.

Також варто зазначити пошкодження волоконно-оптичної інфраструктури через погодні умови. Сильні вітри та викликані ними падіння дерев або гілок пошкоджують підвісні оптичні кабелі, блискавки можуть пошкоджувати металеві елементи кабелів та обладнання, екстремальні температури спричиняють зміну характеристик оптичного волокна, льодові намерзання збільшують навантаження на підвісні кабелі, повені можуть пошкоджувати підземну кабельну інфраструктуру (хоча кабелі прокладені в кабельній каналізації чи у ґрунті менше підтверджені впливу погодних умов). Землетруси, зсуви ґрунту також призводять до пошкодження оптичних мереж.

Будівельні роботи – одна з найчастіших причин пошкодження підземних ВОЛЗ. Під час земляних робіт, особливо в міських умовах, будівельна техніка може пошкоджувати кабелі через в зв'язку з відсутністю або неточністю документації про розташування кабелів, недотримання правил проведення робіт у зоні прокладання комунікацій та неузгоджені земляні роботи без отримання відповідних дозволів.

Підводні кабелі найчастіше пошкоджуються тралами рибальських суден.

Статистика інцидентів безпеки в оптичних мережах демонструє зростаючу тенденцію як випадкових пошкоджень (пошкодження під час виконання будівельних, ремонтних або дорожніх робіт), так і цілеспрямованих атак на інфраструктуру ВОЛЗ (навмисне перерізання корабельними якорями оптичних магістралей у Балтійському морі та біля узбережжя Африки). За даними

дослідницьких організацій, кількість виявлених випадків несанкціонованого доступу до оптичних мереж щорічно зростає на 15-20%, особливо для магістральних ліній зв'язку.

Іноді трапляються пошкодження кабельної інфраструктури тваринами: гризуни пошкоджують кабельну оболонку, а птахи можуть пошкоджувати підвісні кабелі та муфти.

7.5. Технології захисту волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Захист волоконно-оптичних ліній зв'язку потребує комплексного підходу, що поєднує фізичний захист інфраструктури, технічні засоби моніторингу та виявлення втручань, а також організаційні заходи. Сучасні технології дозволяють забезпечити високий рівень безпеки ВОЛЗ, однак вимагають постійного вдосконалення у відповідь на нові загрози та виклики. Ефективна система захисту ВОЛЗ повинна включати:

- багаторівневий фізичний захист інфраструктури;
- системи моніторингу та раннього виявлення загроз;
- механізми резервування та швидкого відновлення після інцидентів;
- підготовлений персонал та чіткі процедури реагування на інциденти.

Різні типи кабельної каналізації потребують індивідуальних рішень. Підземна каналізація захищається люками з прихованими петлями та посиленими механізмами блокування, що унеможливають їх злам без спеціального обладнання. В будівлях оптичний кабель зазвичай прокладається по спеціальним кабельним каналам, що обмежує доступ сторонніх осіб до кабелю. Кабель підвішений на опорах - складніше і пошкодити і захищати. Кабель прокладений в ґрунт зазвичай маркують спеціальними маркерами, які дозволяють виявляти його металодетекторами або спеціальними маркерошукачами (рис. 7.1.). Хоча з особистого досвіду можу сказати, що таке маркування в Україні поширено вкрай мало.



Рис. 7.1. Маркеры OmniMarkerII та маркерошукач Tempo EML-100.

З'єднувальні муфти є вразливими точками - герметизація муфт із вбудованими індикаторами порушення цілісності дозволяє швидко виявляти спроби втручання. Розміщення муфт у важкодоступних місцях, наприклад, у захищених колодязях, додатково знижує ризик несанкціонованого доступу. Для захисту колодязів (чого я майже не зустрічав в Україні, хіба тільки тих, де проходять кабелі спецзв'язку) і технічних приміщень використовуються електронні системи контролю доступу. Ідентифікація за біометричними даними, смарт-картками або мобільними пристроями забезпечує високий рівень безпеки. Датчики відкриття миттєво передають сигнал на пульт охорони, а журнали відвідувань фіксують час і особу, яка отримала доступ, що дозволяє відстежувати всі дії.

Розподільні шафи виготовляються зі сталі товщиною від 1,5 мм, що забезпечує їх міцність. Антивандальні елементи, такі як захист від висвердлювання, і приховані петлі ускладнюють спроби злому. Такі конструкції витримують значні механічні впливи, зберігаючи обладнання в безпеці. Розподільчі шафи або бокси можуть маскуватись під елементи міської

інфраструктури, що знижує їх привабливість для вандалів. Використання вогнестійких і міцних матеріалів підвищує стійкість до пошкоджень.

Оптичні рефлектометри (OTDR) виявляють відгалуження з чутливістю до 0,01 дБ. Автоматичний аналіз рефлектограм порівнює поточні дані з еталонними. Тому дуже часто в кабелі може використовуватись одне волокно, до якого підключений рефлектометр, що контролює в цілодобовому режимі аналізуючи зворотне розсіювання з роздільною здатністю до 10 см і діапазоном до 50 дБ, що дозволяє контролювати лінії довжиною понад 200 км.

Кільцеві топології дозволяють автоматично змінювати напрям передачі даних. Географічно рознесені траси знижують ризик одночасного пошкодження каналів. Системи перемикання з реакцією менше 50 мс забезпечують надійність. Технологія 1+1 передає дані обома каналами одночасно, а 1:1 активує резерв лише при аварії. Резервування на рівні волокон і DWDM-систем підвищує гнучкість. Автоматичне перемикання на резервні канали забезпечує безперебійність зв'язку.

Захист ВОЛЗ поєднує фізичні бар'єри, технічний моніторинг і швидке реагування. Багаторівневий підхід, що включає міцні конструкції, інтелектуальні системи аналізу та резервування, забезпечує надійність і безпеку. Постійне вдосконалення технологій і підготовка персоналу дозволяють ефективно протистояти сучасним загрозам, гарантуючи стабільність зв'язку.

Використана література для написання розділу [3, 9, 10, 31].

Загальні питання для самоконтролю до розділу

- Які ключові переваги ВОЛЗ з точки зору інформаційної безпеки порівняно з мідними провідниками?
- Які специфічні вразливості ВОЛЗ можуть бути використані зловмисниками для несанкціонованого доступу до даних?
- Які економічні наслідки можуть виникнути внаслідок порушення конфіденційності або цілісності даних у ВОЛЗ?
- Як класифікуються загрози ВОЛЗ за цілями впливу, і які дії зловмисників відповідають порушенню конфіденційності, цілісності та доступності?
- Які елементи лінійних споруд оптичної мережі є найбільш вразливими, і чому вони становлять ризик для безпеки ВОЛЗ?
- У чому полягає різниця між контактними методами відгалуження, такими як розрив волокна з встановленням відгалужувача та встановлення Y-подібних відгалужувачів, з точки зору їх реалізації та ризиків виявлення?
- Які технології “прослуховування” оптичних волокон через оболонку застосовуються, і чому підвісні кабелі є більш вразливими до таких методів порівняно з підземними чи підводними кабелями?
- Чому зміна поляризації сигналу є критичною для когерентних систем зв'язку?

- Які основні фізичні загрози лінійним спорудам ВОЛЗ і як їх можна мінімізувати?

- Яким чином погодні умови можуть спричиняти пошкодження волоконно-оптичної інфраструктури?

- Які ключові компоненти ефективної системи захисту волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ)?

- Як різні типи кабельної каналізації впливають на рівень безпеки оптичних мереж?

- Опишіть активні методи втручання в ВОЛЗ (внесення шуму лазером, зміна поляризації, фазові спотворення п'єзоелементами, перехоплення з модифікацією та ретрансляцією), вказавши ціль впливу (конфіденційність, цілісність, доступність), тип систем, до яких метод найкритичніший (когерентні, DWDM, поляризаційне мультиплексування), та ознаки виявлення (зміна OSNR, помилки BER, рефлектограма).

- Поясніть принцип роботи постійного моніторингу ВОЛЗ за допомогою OTDR з виділеним контрольним волокном (чутливість 0,01 дБ, роздільна здатність 10 см, діапазон >200 км).

- Як кільцеві топології з автоматичним перемиканням (<50 мс), резервування 1+1/1:1 та географічно рознесені траси доповнюють фізичний захист (герметичні муфти з індикаторами, антивандальні шафи, маркери OmniMarkerII) для мінімізації ризиків від будівельних робіт, диверсій чи природних загроз?

Глосарій термінів, скорочень та абревіатур

Основи оптики

Амплітуда - Максимальне відхилення значення електромагнітної хвилі від середнього значення.

Віддзеркалення світла - Повернення світлового променя після потрапляння на межу середовищ із різними коефіцієнтами заломлення.

Децибел (dB) - Логарифмічна одиниця вимірювання потужності сигналу та згасання в оптичних системах.

дБм (dBm, dBmW) - Абсолютний рівень потужності в децибелах відносно 1 мВт.

Дисперсія - Зміна швидкості поширення різних довжин хвиль у волокні, що призводить до розмиття сигналу.

Довжина хвилі (λ) - Відстань між двома найближчими точками електромагнітної хвилі, вимірюється в нанометрах (нм).

Довжина хвилі відсічення (λ_{CF} , λ_{CCF}) - Мінімальна довжина хвилі, при якій одномодове волокно підтримує лише одну моду (волоконна або кабельна).

Закони оптики - Фундаментальні правила, що описують поведінку світла в різних середовищах.

Заломлення світла - Зміна напрямку поширення світлових хвиль на межі двох середовищ.

Коефіцієнт заломлення (n) - Характеристика, що визначає відношення швидкості світла у вакуумі до швидкості світла в середовищі ($n = c_0/c$).

Критичний кут (θ_c) - Кут падіння, при якому кут заломлення дорівнює 90° , що забезпечує повне внутрішнє відбиття.

Нормована частота (V) - Параметр, що характеризує кількість мод у волокні, залежить від діаметра сердцевини, числової апертури та довжини хвилі.

Повне внутрішнє відбиття - Явище, за якого світло відбивається від межі сердцевини й оболонки волокна, якщо кут падіння більший за критичний.

Релеївське розсіювання - Ефект, що викликає втрати сигналу через мікроскопічні неоднорідності матеріалу волокна.

Спектр - Діапазон довжин хвиль або частот електромагнітного випромінювання.

Частота (f) - Число повних циклів електромагнітної хвилі за одиницю часу, вимірюється в Герцах (Гц).

Числова апертура (NA) - Параметр, що визначає здатність оптичного волокна збирати та передавати світло ($NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$).

Волоконно-оптичні технології

Багатомодове волокно (MMF) - Оптичне волокно з великою сердцевиною (50 або 62,5 мкм), що підтримує кілька променів світла, використовується для коротких відстаней.

Волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) - Система передавання даних через оптичне волокно.

Втрати - Зменшення потужності сигналу в оптичному волокні через поглинання, розсіювання або вигини.

Втрати на вигинах (α_{rad}) - Згасання сигналу через деформації або вигини волокна, що перевищують мінімально допустимий радіус.

Втрати на поглинання (α_{abs}) - Зменшення потужності сигналу через поглинання світла матеріалом волокна або домішками.

Втрати на розсіювання (α_{sc}) - Зменшення потужності сигналу через релєївське розсіювання внаслідок неоднорідностей волокна.

Вікно прозорості - Діапазон довжин хвиль (850 нм, 1310 нм, 1550 нм), у якому згасання сигналу в волокні мінімальне.

Гібридний кабель - Кабель, що поєднує оптичні волокна та мідні провідники для передачі даних і живлення.

Градiєнтний профiль - Тип волокна, де показник заломлення плавно зменшується від центра серцевини до оболонки.

DSF (Dispersion-Shifted Fiber) - Волокно зі зміщеною дисперсією для зменшення хроматичної дисперсії на 1550 нм.

G.652 - G.657 - Стандарти одномодових волокон для зв'язку.

NFF (Nonlinear Fiber Effects) - Нелінійні ефекти у волокні, що впливають на сигнал при високій потужності (наприклад, самофазова модуляція, чотирихвильове змішування).

NZDSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber) - Волокно з ненульовою зміщеною дисперсією для зменшення нелінійних ефектів у DWDM-системах.

OM1 - OM5 - Стандарти багатомодових волокон для різних застосувань.

Одномодове волокно (SMF) - Оптичне волокно з вузькою серцевиною (8-10 мкм), що передає сигнал без розсіювання.

Оптичне волокно - Тонка скляна або пластикова нитка для проведення світлового сигналу.

Оптичне згасання - Зменшення потужності світлового сигналу через поглинання та розсіювання.

Оптичний бюджет - Допустимий рівень згасання сигналу між передавачем і приймачем.

Оптичний ізолятор - Пристрій, що запобігає зворотному поширенню світла у волокні.

Полімерне оптичне волокно (POF) - Волокно з пластиковою серцевиною, що використовується в коротких мережах.

Ступінчастий профiль - Тип волокна, де показник заломлення різко змінюється на межі між серцевиною та оболонкою.

Компоненти оптичних мереж

Атенюатор - Компонент, що зменшує рівень оптичного сигналу для стабілізації передачі.

Оптична муфта - Захищений корпус для з'єднання оптичних волокон у магістральних кабелях.

Оптичний крос (ODF) - Панель для організації комутації волоконно-оптичних кабелів.

Оптичний роз'єм (конектор) - Елемент для з'єднання оптичного кабелю (LC, SC, MPO, ST, FC, MT-RJ, MU, ESCON, FDDI, DIN, LSH, E2000, SMA).

Оптичний циркулятор - Пристрій, що направляє світловий потік між кількома портами.

Патчкорд - Кабель з двома конекторами для комутації оптичного обладнання.

Пігтейл - Короткий відрізок оптичного волокна з одним конектором для зварювання.

Спліттер - Пристрій для розподілу одного оптичного сигналу на кілька абонентів.

Типи полірування - Техніки обробки торця конектора (PC, UPC, APC) для зменшення втрат сигналу.

Методи спектрального ущільнення

ADD/DROP мультиплексори - Пристрої для вибіркового додавання або видалення окремих довжин хвиль у мережі.

AWG (Arrayed Waveguide Grating) - Оптичний пристрій для мультиплексування/демультиплексування сигналів у WDM-системах.

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) - Менш щільне спектральне ущільнення для регіональних та корпоративних мереж (20 нм між каналами).

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) - Технологія високощільного спектрального ущільнення для магістральних мереж (0,4-0,8 нм між каналами).

SWDM (Shortwave Wavelength Division Multiplexing) - Короткохвильове спектральне ущільнення для багатомодових систем.

TFF (Thin-Film Filter) - Тонкоплівковий фільтр, що використовується в WDM-системах для розділення або об'єднання сигналів із різними довжинами хвиль.

WDM (Wavelength Division Multiplexing) - Технологія спектрального ущільнення, що дозволяє передавати кілька каналів у одному волокні.

Пасивні та активні оптичні системи

Digital Diagnostic - Функція моніторингу параметрів трансивера (температура, потужність, напруга).

EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) - Оптичний підсилювач потужності для довгих магістральних мереж.

FTTB (Fiber to the Building) - Підключення оптичного волокна до будівлі.

FTTC (Fiber to the Curb) - Прокладання оптики до вуличного зв'язку.

FTTH (Fiber to the Home) - Підключення оптики безпосередньо до абонента.

FTTN (Fiber to the Node) - Підключення волокна до вузла зв'язку.

FTTx - Загальна назва технологій доставки оптичного зв'язку до абонента (x — Home, Building, Curb, Node).

GPON (Gigabit Passive Optical Network) - Стандарт пасивної мережі зі швидкістю до 2,5 Гбіт/с.

XGS-PON - Симетрична пасивна оптична мережа з швидкістю до 10 Гбіт/с.

Компенсатори дисперсії - Пристрої для усунення розширення імпульсу у волоконно-оптичних системах.

Медіаконвертер - Пристрій для перетворення сигналу між мідними кабелями та оптоволоконном.

Підсилювач - Пристрій для підсилення оптичного сигналу (PA — попередній, BA — буферний, LA — лінійний).

PON (Passive Optical Network) - Пасивна оптична мережа, що розподіляє сигнал без активних компонентів.

Раманівські підсилювачі - Пристрої для покращення сигналу через ефект Рамана.

Трансивер - Комбінований пристрій для передачі та прийому сигналів (SFP, SFP+, XFP, QSFP, CFP).

Вимірювальне обладнання

Візуальний локатор пошкоджень (VFL) - Тестер, що використовує лазер для виявлення дефектів у волокні.

Оптичний мультиметр - Прилад, що поєднує вимірник потужності та джерело випромінювання.

Оптичний рефлектометр (OTDR) - Пристрій для аналізу оптичного кабелю, визначення місця пошкоджень та розрахунку згасання.

Оптичний тестер - Пристрій для вимірювання потужності світлового сигналу у волокні.

Оптичні транспортні мережі (OTN)

ITU-T G.709 - Міжнародний стандарт, що визначає структуру та механізми OTN.

Liquid OTN - Технологія динамічного розподілу пропускнуої здатності у OTN.

ODUk (Optical Data Unit) - Логічний контейнер, що містить корисне навантаження у OTN.

OPUk (Optical Payload Unit) - Область даних, де міститься користувацький трафік.

OTN (Optical Transport Network) - Стандартизована технологія передачі даних у великих оптичних магістралях.

OTUk (Optical Transport Unit) - Транспортний контейнер для передачі даних у OTN.

TSM (Tandem Connection Monitoring) - Послідовний моніторинг з'єднань у OTN.

QoS (Quality of Service) - Якість обслуговування, що забезпечує пріоритетність даних.

Захист інформації

Активні методи втручання - Техніки несанкціонованого доступу до ВОЛЗ шляхом зміни сигналу.

Пасивні методи несанкціонованого доступу - Перехоплення сигналу без фізичного впливу на волокно (наприклад, через вигини).

Сенсорні системи - Системи для виявлення фізичних впливів на волокно за допомогою інтерференції.

Інші терміни та аббревіатури

CFP - Form-фактор оптичного модуля (C Form-factor Pluggable).

DCI - Data Center Interconnect (міжцентрове з'єднання).

ESCON - Enterprise Systems Connection (стандарт оптичного підключення).

FEC - Forward Error Correction (попередня корекція помилок).

LSH - Тип оптичного конектора.

LX5 - Тип оптичного конектора.

MT-RJ - Mechanical Transfer Registered Jack (тип оптичного конектора).

OSNR - Optical Signal-to-Noise Ratio (співвідношення сигнал/шум у оптиці).

QAM - Quadrature Amplitude Modulation (квадратурна амплітудна модуляція).

DN - Software-Defined Networking (програмно-визначені мережі).

SFP - Small Form-factor Pluggable (компактний трансивер для оптичних і мідних з'єднань).

SFP+ - Small Form-factor Pluggable Plus (тип оптичного трансивера).

SMA - SubMiniature version A (тип оптичного конектора).

WiFi - Wireless Fidelity (бездротовий доступ).

Список використаної літератури

1. Волоконно-оптичні кабелі зв'язку / Каток В.Б., Руденко І.Е., Під ред. Катка В.Б. Логос, Київ, 2013. -333 с. ISBN 978-966-171-692-5..
2. Miloslav Filka. Optoelectronics for telecommunications and informatics. Dallas, texas. 2009. ISBN 978-0-615-33185-0.
3. Комп'ютерні мережі (навчальний посібник)/А.І. Блозва, Ю.В. Матус, В.В. Смолій, Б.С. Гусев, Д.Ю. Касаткін, Т.Ю. Осіпова, Я.А. Савицька// -К.: Компринт, 2018. -583 с.
4. Волоконно-оптичні лінії зв'язку: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / Л. М. Карпуков, О. В. Щекотихін, В.О. Воскобойник - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. - 153с. ISBN 978-617-529-290-7
5. Сливка О.Г., Гомоннай О.О. Методичні вказівки до курсу «Волоконна оптика та оптичні системи зв'язку». - Ужгород.: ДВНЗ "УжНУ", 2013. - 18 с.
6. Волоконно-оптичні системи передачі інформації (ВОСП): навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / О.В. Щекотихін, В.П. Дмитренко, М.В. Єфименко, М.П. Проскурін - Запоріжжя. : НУ «Запорізька політехніка», 2022.- 114 с. ISBN 978-617-529-394-2.
7. Волоконно-оптичні лінії зв'язку / Каток В.Б., Руденко І.Е., Однорог П.М. Під ред. Катка В.Б. Київ, 2016.
8. Будівництво та монтаж волоконно-оптичних систем передачі: підручник [для студентів вищ. навч. закл.] / О.В. Бондаренко, П.П. Воробієнко, В.О. Андрєєв, І.М. Панюта. - Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. - 228 с. ISBN 978-617-582-020-9.
9. Журнал «Телеком. Телекомунікації та мережі» №10, Київ, 2017 г. Манько О.О., Коновалов О.Ю., Нікіфоренко К.Б., Харлай Л.О. «Захист інформації на лінійних спорудах ВОЛЗ».
10. Журнал «Телеком. Телекомунікації та мережі» №10, Київ, 2017 г. Юрій Нікітченко, «Волоконно-оптичні лінії зв'язку в ЗС України».
11. Журнал «Телеком. Телекомунікації та мережі» №3, Київ, 2003 г. Черноус Сергій «Недороге рішення для волоконно-оптичних ліній зв'язку».
12. Журнал «Сети и телекомунікації» №1/2, Київ, 2004 г. Черноус С.М., Довгалюк І.Б. «Успішний досвід впровадження та експлуатації волоконно-оптичних мультиплексорів на мережах зв'язку України».
13. Журнал «Телеком. Телекомунікації та мережі» №10, Київ, 2006 год Черноус С.М., «Професійні прилади – питання стратегії».
14. Журнал «Мережі та Бізнес.» №2, Київ, 2007 год Черноус С.М., «Попит на телекомунікаційні вимірювальні прилади незмінно зростає».
15. Журнал «IT Partner» №1, 2010 Київ, Черноус С.М., «Вибір СКМ для ЦОД».
16. Журнал «IT Partner» №2, Київ, 2010 Черноус С.М., «Керуючи кабельною системою...».

17. Журнал «IT Partner» №2, Київ, 2010 Черноус С.М., «Вимірювання параметрів СКМ».
18. Журнал «IT Partner» №4, Київ, 2010 Черноус С.М., «Сертифікація СКМ. Необхідність чи...».
19. Журнал «IT Partner» №4, Київ, 2010 Черноус С.М., «Оптичні патч корди. На що варто звернути увагу».
20. Журнал «IT Partner» №5, Київ, 2010 Черноус С.М., «СКМ для 10G. Вибір категорії?».
21. Журнал «IT Partner» №5, Київ, 2010 Черноус С.М., «Прилади для роботи з ВОЛЗ».
22. Журнал «IT Partner» №6, Київ, 2010 Черноус С.М., «Монтаж ВОЛЗ: зварювальні апарати INNO Instrument та Vytran».
23. Журнал «IT Partner» №1, Київ, 2011 Черноус С.М., «Побудова 10Гб/с мережі на основі технології спектрального ущільнення DWDM».
24. Журнал «IT Partner» №2, Київ, 2011 Черноус С.М., «FTTx: дотягнуться до абонента».
25. Журнал «IT Partner» №2, Київ, 2011 Черноус С.М., «Якість, перевірена часом».
26. Журнал «IT Partner» №3, Київ, 2011 Черноус С.М., «Еволюціонування протоколу».
27. Журнал «IT Partner» №3, Київ, 2011 Черноус С.М., «Оптичний спліттер як основний елемент побудови мереж PON».
28. Журнал «IT Partner» №4, Київ, 2011 Черноус С.М., «Optokon Mining Applications: рішення для підприємств гірничодобувної промисловості».
29. Журнал «IT Partner» №4, Київ, 2011 Черноус С.М., «Fiber To The Building: Погляд на технологію».
30. Журнал «IT Partner» №5, Київ, 2011 Черноус С.М., «Перспективи полімерних оптичних волокон».
31. Журнал «IT Partner» №6, Київ, 2011- Козир М.М., Івицький І.І., за редакцією Черноус С.М., «Система Flowmon: Тримай свою мережу під контролем».
32. Журнал «IT Partner» №3, Київ, 2012 Черноус С.М., «Широкополосний доступ (ШПД). Короткий екскурс у технологію».
33. Журнал «IT Partner» №2, Київ, 2013 Черноус С.М., «OTT VS IPTV: Битва за глядача».
34. Матеріали XI-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 6-7 квітня 2017 р. УДК 621.396.22.029.7 Волоконно оптичні системи зв'язку Закрева О.В., к.т.н., доц. Шмирьова Л.М.
35. Технічна документація компанії DWDM.ME: MU series DWDM Transmission System User Manual.
36. Технічна документація компанії DWDM.ME: MU-series DWDM Optical Transmission System.

37. Технічна документація компанії ITBiz: ITBiz_brochure_modules
38. Технічна документація компанії Ciena: 6500_Packet_Optical_Platform_A4_PB_ru_RU.
39. Технічна документація компанії Ciena: Advances in Optical Networking.
40. Технічна документація компанії IC-Line: «Книга PON_WDM_CWDM_DWDM».
41. Технічна документація компанії NEC: DW7000 2015.
42. Технічна документація компанії NEC: ODU-Agr_client interface_20170911.
43. Технічна документація компанії NEC: ODU-Agr_Introduction_V1_1.
44. Технічна документація компанії NEC: OTN Switch by ODU-AGR.
45. Технічна документація компанії ITBiz: Оптические трансиверы. Оборудование CWDM и DWDM - решения от ITBiz.
46. Технічна документація компанії ITBiz: Родшоу_Оптические трансиверы. Оборудование CWDM и DWDM - решения от ITBiz.
47. Технічна документація компанії Ekinops.
48. Технічна документація компанії ITBiz: New_Оптические трансиверы. Оборудование CWDM и DWDM.
49. Технічна документація компанії Optokon.
50. Технічна документація компанії R&M (Reichle & De-Massari AG) - матеріали учбової програми по підготовці та сертифікації спеціалістів СКС.
51. Технічна документація компанії Tempo: Маркери OmniMarkerII та маркерошукач Tempo EML-100.
52. Технічна документація компанії EXFO Оптичний рефлектометр модель FTB-1.
53. Технічна документація компанії Tempo: модель OPM510 та модель SLS525.
54. Технічна документація компанії Grandway: оптичний мультиметр і модель FHM2A01.
55. Технічна документація компанії Pro'sKit: тестер цілісності оптоволоконного кабелю модель MT-7510.
56. Технічна документація компанії Multitest: Ідентифікатор активних волокон Multitest.
57. Технічна документація компанії Fluke Networks рефлектометр DTX-OTDR.
58. Технічна документація компанії CTC Union шасі FRM220 <https://www.ctcu.com/en/search/index.html?q=FRM220&type=all>
59. Web-сайт компанії ITBiz: <https://itbiz.ua/>
60. Web-сайт компанії DWDM.ME: <https://DWDM.ME/>
61. Web-сайт компанії <https://e-server.com.ua/>
62. Web-сайт компанії IC-Line: <https://ic-line.ua/>
63. Web-сайт компанії Залізний Гаррі: <https://iron-harry.ua/>
64. Web-сайт компанії Deps: <https://deps.ua/ua/>
65. Web-сайт компанії Технології мереж: <https://nettech.ua/>

66. Презентація The Optical Transport Network (OTN) - G.709 з Web-сайту: <https://www.scribd.com/presentation/628209079/3800769>
67. Технічна документація компанії VIAVI Solutions Inc.: G.709 - The Optical Transport Network (OTN).
68. Інформація з Web-сайту компанії Лун: https://lun.ua/misto/internet?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwlN6wBhCcARIsAKZvD5iFwYpbWWfLRZ9NALMEvL54hQd9WFhhI6KuI69kRdVmIAMci8TQ258aAs-wEALw_wcB&l=1f#5.61/48.373/35.739
69. Інформація з Web-сайту <https://osvitoria.media/news/internet-bez-elektryky-do-72-godyn-yak-diznachyt-de-pratsyuye-xpon/>
70. Інформація з Web-сайту <https://osvitoria.media/news/internet-bez-elektryky-do-72-godyn-yak-diznachyt-de-pratsyuye-xpon/>
71. Інформація з Web-сайту компанії KABELOVNA DĚČÍN PODMOKLY, S.R.O. <https://www.kabelovna.cz/en/>
72. Інформація з каталогу компанії KABELOVNA DĚČÍN PODMOKLY, S.R.O. <https://www.kabelovna.cz/wp-content/uploads/2024/01/22489-KDP-Katalog-Optika-2024-web.pdf>
73. IEC 60793-1 - Оптичні волокна: методи вимірювання. <https://webstore.iec.ch/en/publication/68903>
74. IEC 61300 - Оптичні з'єднувачі: базові методи випробувань. <https://webstore.iec.ch/en/publication/67663>
75. IEEE 802.3 - Ethernet: фізичний рівень та MAC. <https://standards.ieee.org/ieee/802.3/10422/>
76. IEEE 802.3ah-2004 - Ethernet in the First Mile (EPON). <https://standards.ieee.org/ieee/802.3ah/3179/>
77. ITU-T G.652 - Характеристики одномодового оптичного волокна. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-202408-I/en>
78. ITU-T G.653 - Одномодове волокно зі зсувом дисперсії. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.653-201007-I/en>
79. ITU-T G.654 - Одномодове волокно зі зсувом дисперсії та відсічкою. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.654-202408-I/en>
80. ITU-T G.655 - Одномодове волокно з ненульовою зсунутою дисперсією. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200911-I/en>
81. ITU-T G.656 - Волокно з ненульовою дисперсією для широкопasmової передачі. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.656-201007-I/en>
82. ITU-T G.657 - Одномодове волокно, нечутливе до втрат на згинах. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-202408-I/en>
83. ITU-T G.694.1 - Спектральні сітки для WDM (DWDM). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-I/en>
84. ITU-T G.709 - Інтерфейси для оптичної транспортної мережі (OTN). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709-202408-I/en>
85. ITU-T G.798 - Характеристики обладнання OTN. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.798-202408-I/en>

86. ITU-T G.872 - Архітектура оптичної транспортної мережі (OTN).
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.872-202403-I/en>
87. ITU-T G.984 - Гігабітна пасивна оптична мережа (GPON).
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-202202-I/en>
88. ITU-T G.987 - 10-гігабітна пасивна оптична мережа (XG-PON).
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987-201206-I/en>
89. ITU-T G.988 - Інтерфейс керування ONU для оптичних мереж.
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.988-202211-I/en>
90. ITU-T G.9807 - 10-гігабітна симетрична пасивна оптична мережа (XGS-PON). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1-202302-I/en>