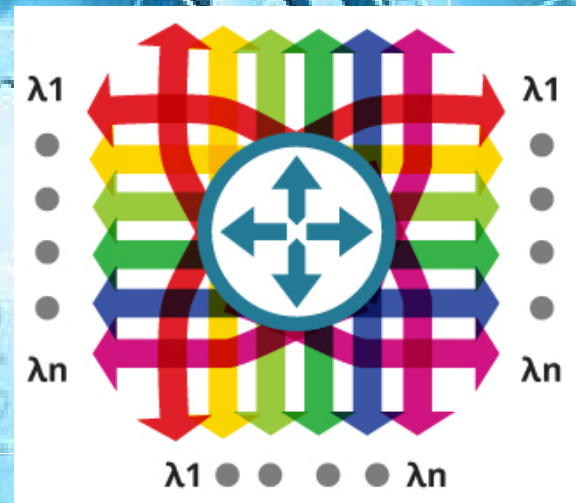


Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак

# ТРАНСПОРТНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ



1G 10G 40G 100G

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак**

**ТРАНСПОРТНІ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ**

**Навчальний посібник**

Вінниця  
ВНТУ  
2017

УДК 621.391(075)  
ББК 32.811я73  
Б21

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 28.04.2014 р.)

Рецензенти:

**О. В. Бондаренко**, доктор технічних наук, професор

**В. А. Лужецький**, доктор технічних наук, професор

**О. В. Осадчук**, доктор технічних наук, професор

**Бортник, Г. Г.**

Б21      Транспортні телекомунікаційні технології : навчальний посібник / Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 162 с.

У навчальному посібнику наведено основні принципи побудови та використання волоконно-цифрових транспортних систем передавання з урахуванням сучасних технологій мультиплексування та обладнання оптичних транспортних мереж. Розглянуті архітектури транспортних мереж з урахуванням систем синхронізації, керування та захисту на основі стандартів OTN-OTN, Ethernet, T-MPLS, ASON/ASTN. Детально розглянуті принципові підходи проектування оптичних транспортних мереж.

Призначений для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка».

УДК 621.391(075)  
ББК 32.811я73

© ВНТУ, 2017

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	4
Вступ.....	6
1 Основи побудови оптичних транспортних мереж .....	7
1.1 Особливості та етапи розвитку ОТМ.....	7
1.2 Топологія та архітектура ОТМ .....	16
1.3 Особливості будови ОТС .....	22
1.4 Особливості визначення рівня ієрархії ОТС .....	24
1.5 Технології захисних переключень в ОТМ .....	29
1.6 Технології оптичних мереж доступу .....	32
1.7 Принципи побудови оптичних мереж доступу .....	36
1.8 Особливості проектування ОМД .....	39
1.9 Особливості проектування гібридної ОМД .....	45
2 Технології мультиплексування в ОТМ.....	48
2.1 Класифікація технологій оптичного мультиплексування.....	48
2.2 Особливості використання DWDM-технології.....	52
2.3 Особливості використання CWDM-технології.....	53
2.4 Функції xWDM-обладнання в ОТМ.....	55
2.5 Будова оптичних мультиплексорів та демультимплексорів.....	58
2.6 Особливості використання термінальних мультиплексорів....	62
2.7 Особливості будови та використання ROADM.....	64
3 Будова та особливості використання компонентів ОТМ .....	68
3.1 Параметри ключових компонентів ОТС.....	68
3.2 Особливості оптичних підсилювачів.....	69
3.3 Особливості будови та використання EDFA-підсилювачів.....	74
3.4 Особливості будови та використання раманівських ОП.....	76
3.5 Особливості використання оптичних інтерфейсів ОТС.....	78
3.6 Будова та використання волоконно-оптичних передавачів.....	90
3.7 Будова оптичних приймачів та особливості їх використання..	95
3.8 Будова та використання пасивних оптичних компонентів.....	102
3.9 Конфігурації основних вузлів ОТМ.....	106
4 Принципи побудови та особливості експлуатації ВОЛТ.....	112
4.1 Особливості структур ВОЛТ.....	112
4.2 Особливості архітектур ВОЛТ.....	115
4.3 Особливості регенерування сигналів у ВОЛТ.....	119
4.4 Особливості компенсації дисперсії у ВОЛТ.....	126
4.5 Особливості оцінювання інерційності ВОЛТ.....	134
4.6 Математичне моделювання процесів у ВОЛТ.....	139
4.7 Особливості формування лінійних сигналів у ВОЛТ.....	146
4.8 Формування та використання лінійних кодів ОТС.....	151
Список літератури.....	161

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

**ANT** – Access Network Transport – транспортна мережа доступу  
**ATM** – Asynchronous Transfer Mode – режим асинхронного передавання  
**CPE** – Customer Premises Equipment – пристрій користувача  
**CPM** – Cross-Phase Modulation – перехресна модуляція фази  
**DEMUX** – демультиплексор  
**DSL** – Digital Subscriber Line – цифрова абонентська лінія  
**GPS** – Global Positioning System – глобальна система позиціонування  
**ISDN** – Integrated Services Digital Network – цифрова мережа інтегрованого обслуговування  
**ISO** – International Organization for Standardization – Міжнародна організація по стандартизації  
**ITU** – International Telecommunication Union – Міжнародний союз електронного зв'язку  
**LA** – Linear Amplifier – лінійний оптичний підсилювач  
**LCN** – Local Communications Network – локальна мережа зв'язку  
**LED** – Light Emission Diode – світлодіод  
**OTDM** – Optical Time Division Multiplexing – оптичне часове ущільнення  
**OTH** – Optical Transport Hierarchy – оптична транспортна ієрархія  
**OTM** – Optical Transport Module – оптичний транспортний модуль  
**OTN** – Optical Transport Network – оптична транспортна мережа  
**PDH** – Plesiochronous Digital Hierarchy – плезіохронна цифрова ієрархія  
**PON** – Passive Optical Network – пасивна оптична мережа  
**QAM** – Quadrature Amplitude Modulation – квадратурна амплітудна модуляція  
**QPSK** – Quaternary Phase-Shift Keying – квадратурна фазова модуляція  
**SDH** – Synchronous Digital Hierarchy – синхронна цифрова ієрархія  
**SONET** – Synchronous Optical Network – синхронна оптична мережа  
**STM** – Synchronous Transport Module – синхронний транспортний модуль  
**VC** – Virtual Container – віртуальний контейнер  
**WAN** – Wide Area Network – глобальна мережа  
**WDM** – Wavelength Division Multiplexing – мультиплексування з розділенням за довжинами хвиль (спектральне ущільнення)  
**WM** – Wavelength Multiplexing – хвилевий мультиплексор  
**xDSL** – x Digital Subscriber Line – цифрова абонентська лінія x-типу  
**АЦП** – аналого-цифровий перетворювач  
**АЧХ** – амплітудно-частотна характеристика  
**ВОК** – волоконно-оптичний кабель  
**ВОЛЗ** – волоконно-оптична лінія зв'язку  
**ВОЛТ** – волоконно-оптичний лінійний тракт  
**ВОСП** – волоконно-оптична система передавання інформації  
**ВП** – вікно прозорості  
**ВСШ** – відношення сигнал/шум

**ЕОП** – електрооптичний перетворювач  
**КС** – комутаційна станція  
**ЛД** – лазерний діод  
**ЛОК** – лінійний оптичний кабель  
**ЛТ** – лінійний тракт  
**ЛФД** – лазерний фотодіод  
**МД** – модова дисперсія  
**НРП** – необслуговуваний регенераційний пункт  
**ОБС** – одна бічна смуга  
**ОВ** – оптичне волокно  
**ОЕП** – оптоелектронний перетворювач  
**ОІ** – оптичний інтерфейс  
**ОК** – оптичний кабель  
**ОМД** – оптична мережа доступу  
**ОМС** – оптична мультиплексна секція  
**ОП** – оптичний підсилювач  
**ОТ** – оптичний тракт  
**ОТІ** – оптична транспортна ієрархія  
**ОТМ** – оптична транспортна мережа  
**ОТС** – оптична транспортна система  
**ОТСМ** – оптичні транспортні системи та мережі  
**ОЧМ** – оптичне частотне мультиплексування  
**ОЧУ** – оптичне часове ущільнення  
**ПК** – персональний комп'ютер  
**ПЦІ** – плезіохронна цифрова ієрархія  
**ПЦП** – первинний цифровий потік  
**СД** – світлодіод  
**СД** – система доступу  
**СРК** – спектральний розподіл каналів  
**ТКС** – телекомунікаційна система  
**ТМ** – транспортна мережа  
**ФАПЧ** – фазове автоматичне підстроювання частоти  
**ЦСП** – цифрова система передавання  
**ФМ** – фазова модуляція  
**ШД** – ширококутовий доступ

## ВСТУП

Зв'язок по оптичному волокну (ОВ) є найбільш досконалою технологією передавання, тому що забезпечує передавання великих обсягів інформації на значні відстані за рахунок малих втрат при дуже широкій смузі пропускання, низьких спотвореннях сигналу, хорошій електромагнітній сумісності та довговічності.

Транспортна мережа базується на сукупності ресурсів систем передавання (каналів, трактів, секцій та ділянок передавання), засобів контролю, оперативного переключення, резервування та керування, які призначені для транспортування інформації між заданими об'єктами. До складу оптичної транспортної мережі (ОТМ) входять також системи синхронізації та керування.

В оптичній транспортній мережі, яка об'єднує PDH-, SDH-мережі та мережі на основі IP/MPLS-, Ethernet-технологій широко використовуються технології щільного спектрального розділення каналів (DWDM) та оптичної транспортної ієрархії (OTH). При цьому основним типом обладнання волоконно-оптичних систем передавання з спектральним розподілом каналів (ВОСП-СР) є мультисервісні транспортні платформи (MSTP), які підтримують функції крос-комутації, вводу/виводу оптичних каналів DWDM та транспортування різного інформаційного трафіка (PDH, SDH, Ethernet, IP та ін.).

Основними функціональними вузлами оптичних транспортних мереж на основі мультисервісних транспортних платформ є динамічні оптичні мультиплексори вводу/виводу (ROADM) та оптичні крос-комутатори (ОХС), які забезпечують програмний ввід/вивід та крос-комутацію оптичних каналів.

Потрібно відмітити, що впровадження нових методів формування та оброблення сигналів для підвищення швидкості передавання інформаційних сигналів, зниження впливу хроматичної й поляризаційної модової дисперсії в оптичних каналах та економне використання робочого діапазону є основним способом збільшення пропускної здатності сучасних ОТМ.

# 1 ОСНОВИ ПОБУДОВИ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

## 1.1 Особливості та етапи розвитку ОТМ

Основними задачами, які розв'язуються за допомогою ОТМ є забезпечення ущільнення з'єднувальних ліній АТС, радіорелейного зв'язку прямої видимості та тропосферного зв'язку, супутникового зв'язку з багатостанційним доступом.

Стрімкий розвиток оптичних технологій та обладнання ВОСПІ забезпечується їх унікальними параметрами:

- малі затухання та дисперсія ОВ;
- широкосмуговість ЛТ;
- малі габарити і маса ОВ та ОК;
- стабільність параметрів оптичних каналів передавання (ОКП);
- підвищена завадостійкість (відсутність впливу зовнішніх електромагнітних полів);
- можливість подальшого удосконалення.

Використання ВОСПІ забезпечує ряд переваг над ЦСП, які працюють по мідному кабелю, чим і пояснюється стрімке впровадження в інформаційні мережі оптичних ліній зв'язку.

Основними перевагами ВОСПІ є:

- широка смуга пропускання (за рахунок надзвичайно високої носійної частоти  $10^{14}$  Гц);
- висока швидкість передавання інформації (Тбіт/с);
- мале значення затухання оптичного сигналу (0,2–0,3 дБ/км на довжині хвилі 1,55 мкм) та низька дисперсія, забезпечують побудову ВОЛТ без підсилення та регенерації протяжністю понад 100 км;
- низький рівень шумів та висока завадостійкість.

На початковій стадії розвитку xWDM-технології було освоєно лише 3 вікна прозорості – 0,85, 1,3 та 1,55 мкм. Залежно від розміщення оптичних каналів в цих вікнах ОТС з СРК поділились на:

- прості WDM – системи (номінальне частотне рознесення каналів не менше 200 ГГц, 8 каналів);
- щільні WDM – системи DWDM (частотне рознесення каналів не менше 100 ГГц, до 40 каналів);
- надщільні WDM – системи HDWDM (частотне рознесення каналів дорівнює 50, 25 та 12,5 ГГц, кількість каналів відповідно 80, 160 та 320).

Згідно з рекомендацією G.692 WDM-системи на базі стандартного частотного плану поділяються на 3 групи:

- грубі WDM (CWDM) – системи з частотним рознесенням каналів не менше 200 ГГц та дозволяють мультиплексувати не більше 18 каналів;
- щільні WDM (DWDM) (частотне рознесення каналів не менше 100 ГГц, до 40 каналів);
- надщільні WDM (HDWDM) (з частотним рознесенням каналів 50 ГГц та менше, кількістю каналів не менше 64).



На рисунку 1.1 показані структурні схеми, що ілюструють еволюцію оптичних транспортних мереж (ОТМ).

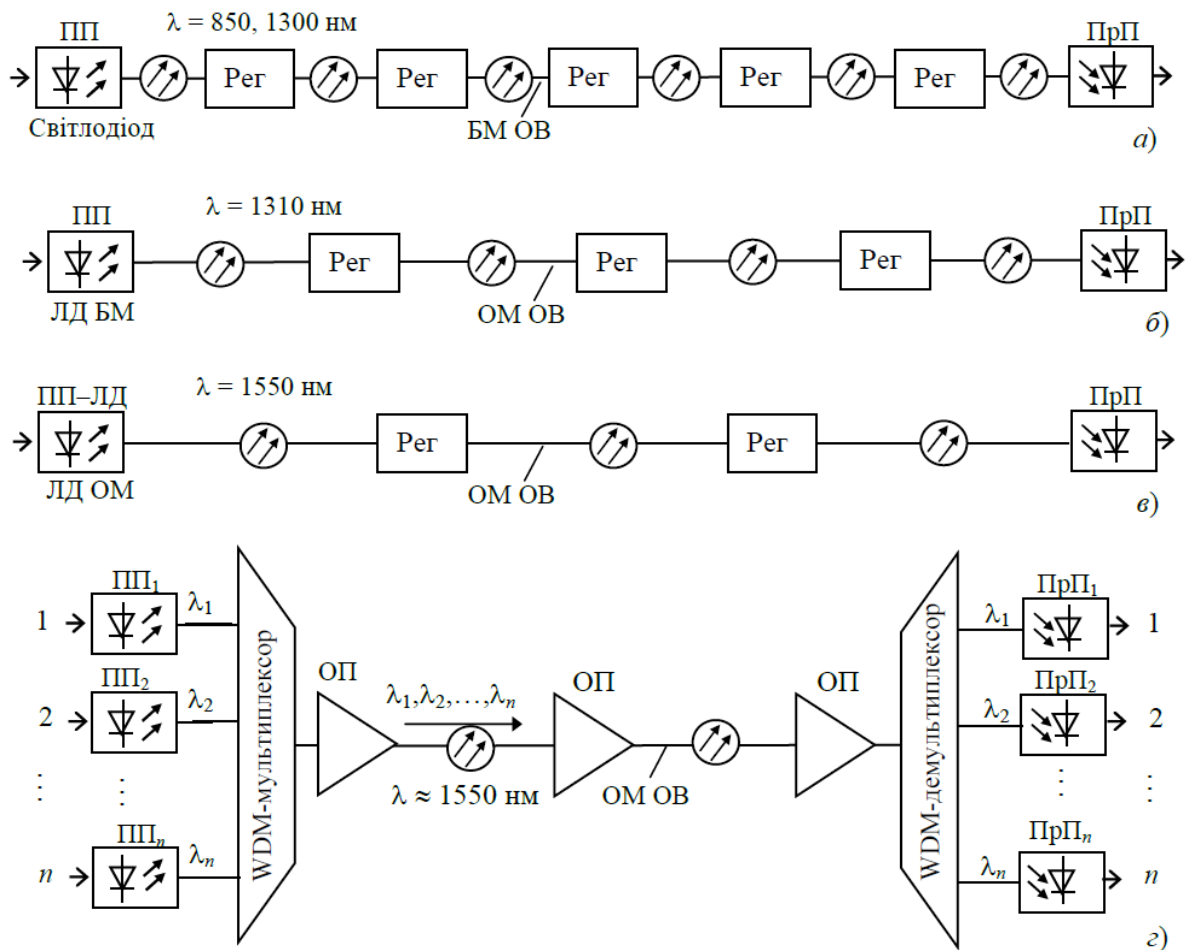


Рисунок 1.1 – Узагальнені структурні схеми ОТС:

а – багатоходова із застосуванням СД на  $\lambda = 850$  нм або  $\lambda = 1300$  нм;

б – одномодова з БМ-лазерами на  $\lambda = 1300$  нм;

в – одномодова з ОМ-лазерами на  $\lambda = 1550$  нм;

г – WDM-система на  $\lambda = 1550$  нм з оптичними підсилювачами (ОП)

Перші ОВ з кварцового скла мали три «вікна прозорості» (ВП) – 850, 1300 та 1550 нм в ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль. Найменший коефіцієнт загасання (приблизно 0,25 дБ/км) має місце у ВП 1550 нм та приблизно 0,5 дБ у ВП 1300 нм (рис. 1.2).

Першими були створені багатомодові (БМ) ОВ з діаметром світлоносіїної серцевини 50 мкм, що набагато перевищує значення робочої довжини хвилі оптичного сигналу. З цієї причини БМ ОВ підтримують передавання багатьох мод розповсюдження, що йдуть серцевиною ОВ з різною фазовою швидкістю.

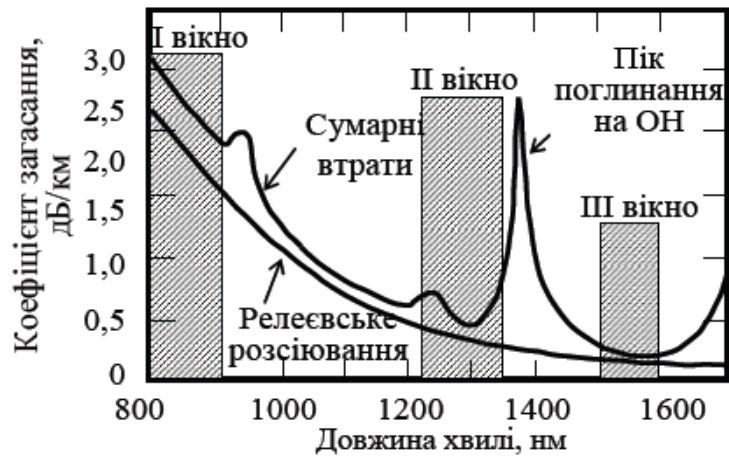


Рисунок 1.2 – Залежність коефіцієнта загасання стандартного ОВ від довжини хвилі (старе трактування ВП ОВ)

Перші ОТС базувались на БМ ОВ та СД або ЛД, що працювали на довжинах хвиль 850 або 1300 нм. Перші ЛД були багатомодовими (БМ) лазерами з резонатором Фабрі-Перо (ФП) та мали досить широкий спектр випромінювання 2–10 нм, що складається з ряду піків (спектральних ліній), які свідчать про багатомодовий характер випромінювання. СД та БМ ЛД випромінюють світло в широкому спектрі, проте СД має суцільний (неперервний) спектр, тоді як спектр ЛД є дискретним.

В перших ОТС (рис. 1.1, а) НРП включались у ВОЛЗ через кожні декілька кілометрів. Обмеження довжини ділянки регенерації було пов'язане з явищем модової (міжмодової) дисперсії. Причиною появи цього типу дисперсії є багатопроменевий характер розповсюдження сигналу через те, що енергія імпульсу в БМ ОВ розповсюджується багатьма порціями по різних траєкторіях з відмінною фазовою швидкістю. Різні моди досягають кінця ОВ в відмінні моменти часу, що призводить до збільшення тривалості (розширення) імпульсу та звуження смуги пропускання середовища передавання. Перші ОТС працювали на швидкості 2–140 Мбіт/с (плезіохронна цифрова ієрархія (ПЦІ)). Регенератори встановлювалися приблизно через 10 км. Багатомодові ОВ і зараз застосовуються в локальних обчислювальних мережах (ЛОМ).

В другому поколінні ОТС використовується довжина хвилі 1310 нм та одномодове ОВ, в якому усунена модова дисперсія. Одномодове ОВ має порівняно малий діаметр світлоносійної серцевини (приблизно 8 – 10 мкм), який лише у декілька разів перевищує робочу довжину хвилі. Ці системи мали довжину ділянки регенерації приблизно 40 км при швидкості передавання 140 Мбіт/с. Максимальна відстань між регенераторами тут обмежувалася загасанням у волокні, а не дисперсією.

ОТС з робочою довжиною хвилі 1550 нм дозволяють використовувати переваги малих втрат в ОВ в цьому ВП, що забезпечує подвоєння довжини ділянки регенерації. Але в області довжин хвиль 1550 нм присутнє інше

явище, а саме, хроматична дисперсія, яка стає чинником, що обмежує швидкість передавання інформації (довжину ділянки регенерації). Хроматична дисперсія є другим видом дисперсії сигналів в ОВ внаслідок якої відбувається розширення імпульсу на виході, подібно тому, як це було при багатомодовому передаванні.

На наступному етапі було розроблено одномодове ОВ зі зміщеною в третє ВП (1550 нм) нульовою дисперсією (DSF). Це ОМ ОВ забезпечило мінімальну дисперсію сигналу в третьому ВП та зняло обмеження на довжину ВОЛТ.

Відомо, що БМ-лазери з резонатором ФП генерують випромінювання з шириною спектра 2–10 нм, що еквівалентно смузі в сотні ГГц та суттєво більше ширини смуги модульовального сигналу (одиниці-десятки ГГц). При зменшенні ширини спектра ЛД до ширини смуги модульовального сигналу, спотворення внаслідок хроматичної дисперсії значно зменшуються. Це мотивувало створення лазерного джерела з вузьким спектром, а саме лазера з розподіленим зворотним зв'язком (DFB) (одномодовий лазер з однією поздовжною модою (SLM)). Цей лазер генерує світло на одній довжині хвилі, що забезпечує збільшення швидкості передавання до 1–10 Гбіт/с.

Важливим проривом в розвитку ОТМ було створення оптичних підсилювачів (ОП) на основі легованого ербієм волокна (EDFA). Основним компонентом цих ОП є активне одномодове ОВ завдовжки в декілька десятків метрів, серцевина якого легована рідкоземельним елементом – ербієм.

Атоми ербію в активному ОВ накачуються за допомогою зовнішнього потужного джерела світла і при цьому переходять з стаціонарного (низькоенергетичного) до збудженого (високоенергетичного) стану. Фотон сигналу, що надходить в таке середовище, стимулює переходи збуджених атомів ербію до низькоенергетичного стану. При цьому кожен атом ербію випускає фотони сигналу, що надходять з лінії, викликають емісію додаткових фотонів, тобто відбувається оптичне підсилення в 20–30 дБ.

Поява EDFA-підсилювачів підштовхнула до створення третього покоління ОТС. Здатність цих ОП одночасно підсилювати сигнали на багатьох довжинах хвиль в області 1550 нм забезпечила принципово іншу стратегію нарощування пропускної здатності ОТС, тобто використання мультиплексування оптичних сигналів з розділенням по довжині хвилі (WDM). Застосування WDM-технології разом з EDFA ОП дозволило суттєво збільшити пропускну здатність та знизити вартість ОТС. В xWDM ОТС на проміжних пунктах один ОП замінив декілька регенераторів, що дозволило динамічно нарощувати їх інформаційну ємність.

Пропускна здатність перших xWDM ОТС з EDFA ОП не перевищувала 10 Тбіт/с в одному ОВ. При цьому швидкість передавання в одному спектральному каналі збільшилася до 40 Гбіт/с.

Завдяки появі EDFA ОП в складі xWDM ОТС довжина їх ВОЛТ стала більшою ніж 80 км, що призвело до істотно більшого розширення імпульсу внаслідок хроматичної дисперсії сигналів в ОВ. Спектр лінійного сигналу

можна зменшити за допомогою зовнішнього оптичного модулятора. При безпосередній (більш простій та дешевій, ніж зовнішня) модуляції виникають перехідні процеси (явище чірпінгу), що розширюють спектр лінійного оптичного сигналу. Тому, використання зовнішніх модуляторів разом з OM-лазерами (наприклад DFB-лазерами) та підсилювачами EDFA дозволяє збільшити довжину ділянки регенерації ВОЛТ приблизно до 600 км при швидкості інформаційного потоку 2,5 Гбіт/с по стандартному OM OB на довжині хвилі 1550 нм. Для швидкості передавання 10 Гбіт/с довжина ділянки регенерації є меншою.

Наступним етапом став розвиток методів компенсації хроматичної дисперсії, щоб знизити дисперсію в OB до прийнятих значень на протяжній (сотні км) підсилювальній ділянці. Ці методи дозволили досягнути відстаней між НРП в декілька тисяч кілометрів при швидкості передавання 10 Гбіт/с в одному спектральному каналі.

Однак існує декілька видів нелінійних ефектів в OB при WDM-передаванні внаслідок великої (понад 100 мВт) введеної в OB оптичної потужності. Основним з яких є ефект чотирехвильового зміщення (FWM), при якому три оптичні сигнали з різними довжинами хвиль взаємодіють у нелінійному OB та створюють четвертий сигнал з довжиною хвилі, яка може збігатися з довжиною хвилі одного із спектральних каналів, що викликає міжканальні переходи.

Сучасні xWDM-системи можуть забезпечити сотні спектральних каналів, що передаються зі швидкістю 10 Гбіт/с при міжканальному інтервалі 50 ГГц та відстані між НРП до декількох тисяч кілометрів. Також є багато xWDM OTC, що працюють на швидкості 40 Гбіт/с в одному каналі.

В таблиці 1.1 наведена сучасна класифікація діапазонів довжин хвиль, в яких працюють OTC. Перші xWDM-системи були створені для роботи в C-діапазоні, оскільки саме в цьому діапазоні функціонували розроблені у той час ОП. Сучасні EDFA ОП забезпечують роботу xWDM OTC також в L-діапазоні. Використання розподіленого по довжині волокна підсилення дозволяє також працювати в діапазонах S та U. При виборі відповідної довжини хвилі накачування можна реалізувати раманівське підсилення на будь-якій бажаній довжині хвилі. Розроблені нові типи OM OB зі зменшеними втратами в області водяного піку (1383 нм) забезпечили можливість працювати в E-діапазоні, але через відсутність ОП для цього діапазону, його використовують головним чином для передавання на короткі відстані.

Потрібно відмітити, що значення міжканального інтервалу для xWDM OTC визначається такими факторами:

- лінійними переходами між каналами, які виникають в мультиплексорах, демультиплексорах та між оптичними фільтрами, що розміщені в блоці OA/OD;

- нелінійними переходами між каналами, що виникають в OB.

Найбільш критичними є переходи від чотирехвильового змішування (FWM).

Таблиця 1.1 – Класифікація робочих діапазонів ОТС, що працюють по ОМ ОВ

Позначення діапазону	Назва діапазону	Інтервал довжин хвиль, нм
<i>O</i> (Original)	Первинний (оригінальний)	1260–1360
<i>E</i> (Extended)	Розширений (продовжений)	1360–1460
<i>S</i> (Short)	Короткохвильовий	1460–1530
<i>C</i> (Conventional)	Стандартний	1530–1565
<i>L</i> (Long)	Довгохвильовий	1565–1625
<i>U</i> (Ultra-long)	Ультрадовгохвильовий	1625–1675

Отже, основними етапами розвитку елементної бази та технологій ОТС є:

1. Оптичне волокно:

- градієнтне багатомодове ОВ (MMF);
- стандартне одномодове ОВ (SSF);
- волокно з нульовою зміщеною дисперсією (DSF);
- волокно з ненульовою зміщеною дисперсією (NZ DSF);

2. Джерело випромінювання:

- світлодіод;
- багатомодовий лазер Фабрі-Перо;
- одномодовий лазер з розподіленим брегівським відбиттям (DBR);
- одномодовий лазер з розподіленим зворотним зв'язком (DFB);
- лазер з вертикальним резонатором (VCSEL);

3. Робоча довжина хвилі:

- 850 нм;
- 1300 нм;
- 1550 нм;
- 1530–1565 нм (С-діапазон);
- 1530–1625 нм (С- та L- діапазони);

4. Кількість оптичних каналів:

- один оптичний канал;
- дво- та триканальне WDM-передавання на 850 нм, 1310 нм та 1550 нм;
- «грубе» CWDM-мультиплексування 4, 8 каналів;
- спектрально-«щільне» DWDM-мультиплексування 16, 32, 40 каналів;
- «дуже щільне» HDWDM-мультиплексування 96, 192 каналів;

5. Формат лінійного сигналу:

- код NRZ;
- код RZ;
- дуобінарний формат;
- фазомодульований RZ код;

6. Відновлення оптичного сигналу:

- класична оптично-електро-оптична (О-Е-О) регенерація;
- ербієві оптичні підсилувачі;
- раманівські оптичні підсилувачі;

- компенсація хроматичної дисперсії;
- компенсація поляризаційної модової дисперсії;
- повністю оптична регенерація;

7. Швидкість передавання інформаційного потоку в оптичному каналі:  
 2 Мбіт/с; 8 Мбіт/с; 34 Мбіт/с; 155 Мбіт/с; 622 Мбіт/с; 2,5 Гбіт/с; 10 Гбіт/с;  
 40 Гбіт/с; 160 Гбіт/с;

8. Маршрутизація оптичного сигналу:

- О-Е-О перетворення;
- оптичний мультиплексор вводу/виводу;
- оптична комутація;
- повністю оптична мережа.

Оскільки, сучасні ОТС-WDM розраховані для роботи в 3 та 4 ВП спектра ОВ, тому значення сумарної оптичної потужності у ВОЛТ цих систем регламентовано рекомендаціями G.692 та обмежується на рівні 17 дБм (50 мВт), що обумовлено двома факторами:

- допустимим впливом нелінійних спотворень у вигляді додаткових шумів та перехресних завад в ОВ (самомодуляції фази оптичної носійної (SPM), перехресної модуляції фази (CPM), чотирихвильового змішування та ефекту примусового розсіювання Брілюєна);

- вимогами безпеки для обслуговуючого персоналу.

Схему реалізації методу оптичного часового ущільнення (ОЧУ) в ОТС СЦІ показано на рисунку 1.3.

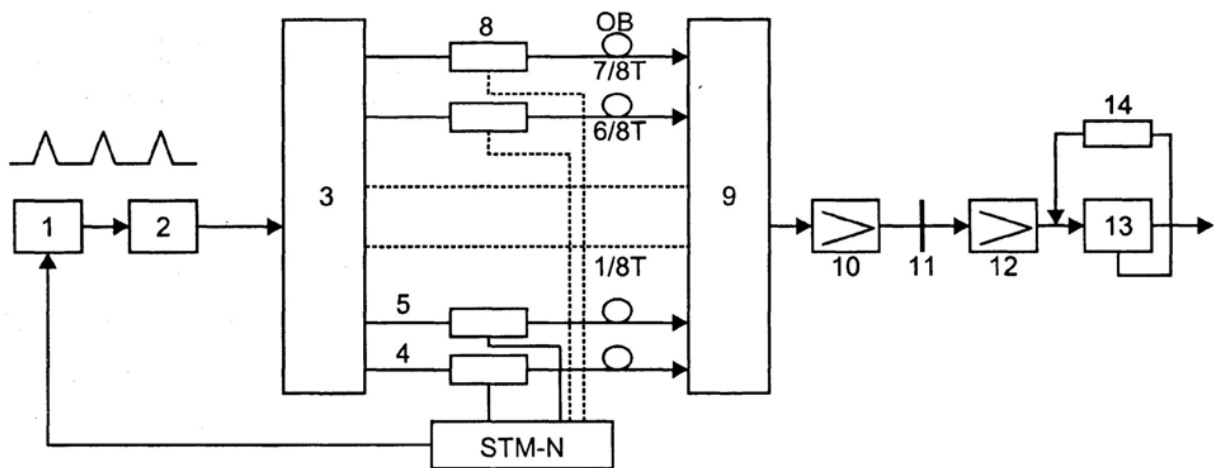


Рисунок 1.3 – Структурна схема ОТС з оптичним часовим ущільненням (OTDM)

Оптичне часове ущільнення в ОТС СЦІ здійснюється в такій послідовності:

- вихідний синхронізований еталонним таймером системи СЦІ оптичний потік з лазера (1) подається через оптичний підсилювач (2) на оптичний розгалужувач (3), який розділяє його на 8 частин та подає на оптичні модулятори (4–8);

- вихідні потоки з оптичних модуляторів, що пропускаються через лінійні затримки (виконується часовий розподіл потоків з інтервалом  $1/8T$ ), подаються на вхід суматора (9);
- підсилений в ОП (10) та (11) груповий потік передається у ВОЛЗ;
- для компенсації енергетичних втрат оптичного сигналу у ВОЛЗ використовуються додаткові підсилювачі (12), з виходу яких груповий сигнал подається на оптичний часовий демультиплексор (13), який синхронізується блоком (14).

Таке ОЧУ забезпечує транспортування 8 інформаційних потоків по 10 Гбіт/с в кожному діапазоні хвиль 1530–1560 нм. Потрібно відмітити, що найбільш перспективним підходом для побудови ОТС є поєднання OTDM-та xWDM-методів.

ОТМ обмежена точками доступу оптичних каналів передавання та об'єднує ресурси мережі, які виконують функції: передавання інформації, контролю та управління мережею. Передавання сигналів інформаційного навантаження є основною функцією ОТМ. Допоміжною функцією підтримки є контроль та управління мережею, які реалізовані в автоматизованій системі контролю та управління мережею.

Сучасні ОТМ базуються на технологіях спектрального розподілу каналів (СРК), (WDM) та оптичній транспортній ієрархії (ОТІ) на основі принципу частотного розподілу каналів в оптичному діапазоні електромагнітних хвиль. При цьому в одному ОВ створюються оптичні канали з носійними сигналами різних довжин хвиль. Залежно від відстані між рознесеними носійними частотами оптичних каналів розрізняють такі основні види спектрального розподілу каналів:

- грубий спектральний розподіл каналів (CWDM);
- щільний спектральний розподіл каналів (DWDM).

Основні параметри CWDM- та DWDM-систем наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні параметри CWDM- та DWDM-систем

Характеристика	CWDM	DWDM
Значення міжканального інтервалу (рознесення робочих частот)	20 нм (2000 ГГц)	1,6/0,8/0,4 нм (200/100/50 ГГц)
Діапазони робочих частот	O, E, S, C, L	C, L
Кількість каналів	Макимум 16	Десятки – сотні
Собівартість каналу	Низька	Висока

Згідно з рекомендацією G.694.2 спектральні діапазони для одномодових волокон мають такі позначення:

- O – початковий (1260 – 1360 нм);
- E – розширений (1360 – 1460 нм);
- S – короткохвильовий (1460 – 1530 нм);
- C – стандартний (1530 – 1570 нм);

L – довгохвильевий (1570 – 1625 нм).

Перевагами OTM OTI є:

- прозорість оптичних каналів для різних видів високошвидкісного оптичного трафіка;
- висока ефективність використання пропускної здатності ОВ;
- можливість збільшення пропускної здатності мережі в процесі експлуатації без заміни ОК;
- висока гнучкість розподілення пропускної здатності мережі;
- наявність різних типів автоматичного захисту оптичних каналів (ОКн) та оптичних мультиплексорних секцій, які забезпечують високу надійність OTM;
- сучасні засоби контролю та керування мережею;
- дотримання міжнародних стандартів в рамках ІТУ-Т.

OTM будуються відповідно до таких моделей:

- транспортна мережа СЦІ (SDH), рекомендації G.707, G.783, G.803;
- транспортна АТМ-мережа, рекомендації I.311, G.326;
- транспортна OTM-OTI-мережа (OTN-OTH), рекомендації G.709, G.798, G.872;
- транспортна Ethernet-мережа, рекомендації G.8010, G.8011, G.8012.

Ці моделі характеризуються такими параметрами:

- ієрархічна будова рівнів, кожен з яких має власний набір функцій;
- наявність фізичного рівня, який базується на секційній системі передавання;
- наявність фізичних та віртуальних трактів;
- наявність рівнів взаємодії з користувачем ТМ.

Модель OTM СЦІ складається з 3-х рівнів, а саме: середовища передавання, трактів (маршрутів передавання інформації) та каналів передавання.

Середовище передавання складається з ВОЛЗ, в яких в основному розміщуються секції регенерування та мультиплексування цифрових лінійних сигналів та додаткових блоків:

- волоконних світловодів в комплекті різних кабелів;
- електрооптичних та оптоелектронних перетворювачів;
- оптичних підсилювачів;
- оптичних атенуаторів та компенсаторів дисперсії;
- роз'ємних та нероз'ємних оптичних з'єднувачів;
- лінійних кодерів та декодерів;
- оптичних модуляторів та детекторів.

Рівень трактів ТМ СЦІ поділяється на 2 підрівні: віртуальні контейнери високого та низького порядків, які є циклічними цифровими ємностями для інформаційних даних з заданими швидкостями.

Рівень каналів мережі СЦІ забезпечує необхідні інтерфейси для користувачів ТМ. За допомогою зчеплень віртуальних контейнерів та протоколів узгодження виконується об'єднання потоків Е1 вторинних мереж з мережами Ethernet.



Модель OTM-OTI складається з 2-х рівнів: самої OTM та користувача. Рівень OTM складається з 3-х фізично та логічно пов'язаних підрівнів:

- середовища передавання сигналів з розподілом за довжинами хвиль (xWDM);

- оптичних секцій ретрансляції (OTS) та мультиплексування (OMS);
- оптичних каналів (OCh) навантажених оптичними транспортними блоками (OTUk), в які включено блоки даних оптичних каналів (ODUk), та в які, в свою чергу, включено блоки інформаційного навантаження оптичних каналів (OPUk).

Індекс k вказує рівень ієрархії OTM (значення швидкодії інформаційного потоку даних).

Рівень користувача OTM OTI виконує функції інтерфейсу взаємодії між OTM та мережами користувачів транспортних послуг: мережі СЦІ, АТМ та Ethernet. Для ефективного узгодження роботи між мережами використовуються різні варіанти розподілу даних користувачів в ОКн згідно з протоколами, які узгоджують циклічне передавання даних в ОКн із випадковим в часі передаванням пакетів даних різної ємності (пакети IP, MPLS або Ethernet).

## 1.2 Топологія та архітектура OTM

Під архітектурами OTM необхідно розуміти різні схеми включень оптичного обладнання в мережі згідно з встановленими правилами (точка – точка, лінійна ланка, кільце, комірки і т. і.).

Архітектура «точка – точка» – це два з'єднаних мережних елементи (термінальні мультиплексори), між якими можуть бути проміжні регенератори у випадку довгих ВОЛТ (рис. 1.4).

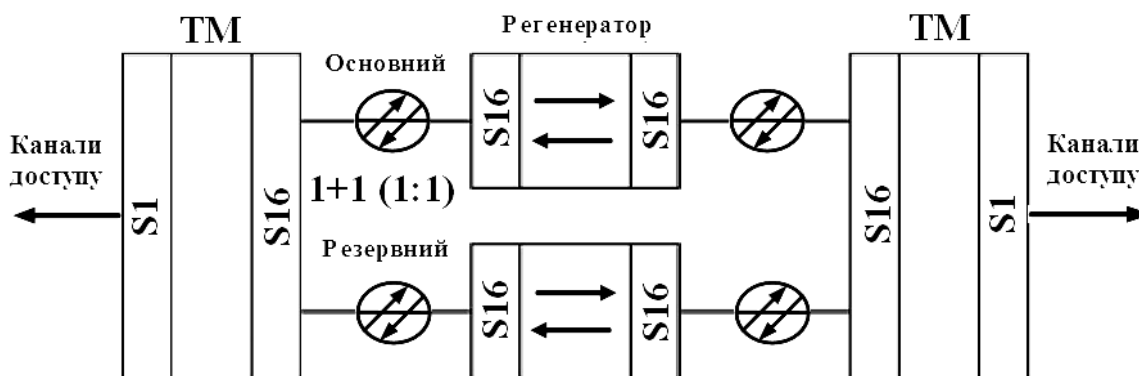


Рисунок 1.4 – Топологія OTM типу «точка – точка»

Така топологія OTM широко використовується на магістральних xWDM-мережах з швидкістю передавання інформаційних потоків від 2,5 до 10 Гбіт/с (рис. 1.5). При цьому система захисту може бути реалізована за допомогою xWDM- або SDH-мультиплексорів.

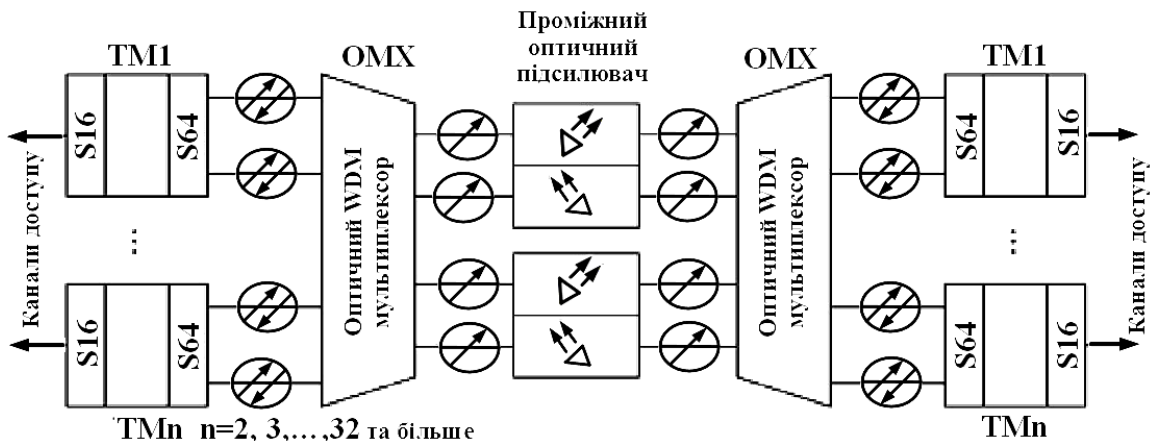


Рисунок 1.5 – Узагальнена структура ОТМ типу «точка – точка» на основі термінальних мультиплексорів SDH (STM-64) та оптичних xWDM-мультиплексорів

В цій структурі забезпечено проміжне підсилення та корекція оптичних багатохвильових сигналів за допомогою оптичних підсилювачів, які можуть замінити  $2n$  ( $n = \text{від } 2 \text{ до понад } 32$ ) регенераторів. Перевагою такого принципу побудови ОТМ є можливість поступового нарощування ємності мережі без заміни проміжних підсилювачів та збереження системи захисту в секції ВОЛТ.

Структура ОТМ типу «лінійна ланка» об'єднує термінальні та проміжні мережні елементи з каналами доступу (рис. 1.6). Ця структура використовується на коротких та спрощених ВОЛТ (технологічна транспортна мережа) і може забезпечити доступ до каналів в проміжних мультиплексорах вводу/виводу ADM. Ця схема не має лінійного захисту та характеризується простою будовою і низькою вартістю.

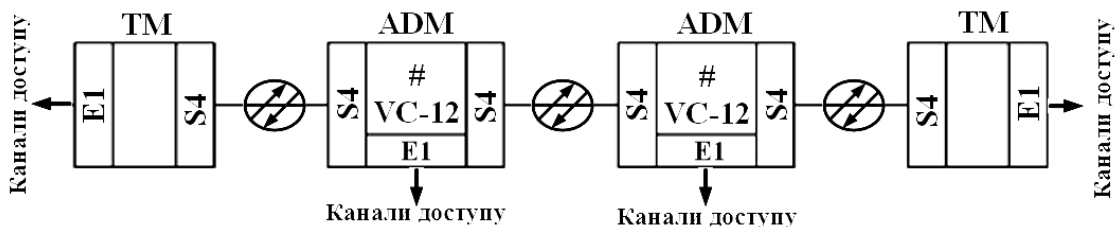


Рисунок 1.6 – Узагальнена структура ОТМ типу «лінійна ланка»

У випадку використання системи лінійного захисту в цій структурі ОТМ, вона перетвориться в плоске (сплющене) кільце (рис. 1.7).

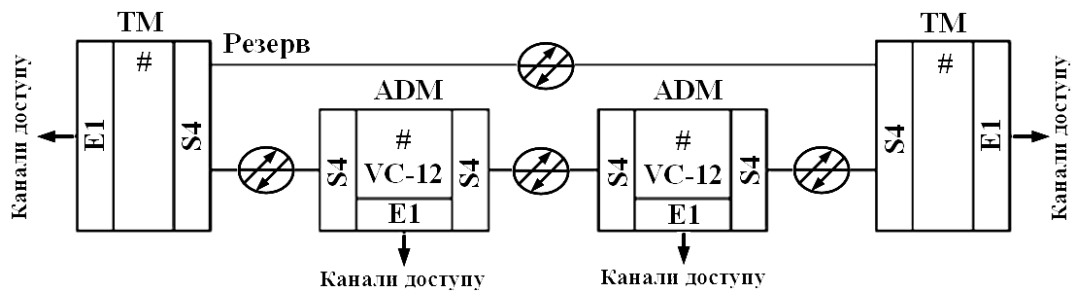


Рисунок 1.7 – Узагальнена структура ОТМ типу «плоске кільце»

Використання обладнання OADM в структурі ОТМ типу «лінійна ланка» забезпечує підвищення її ефективності (рис. 1.8).

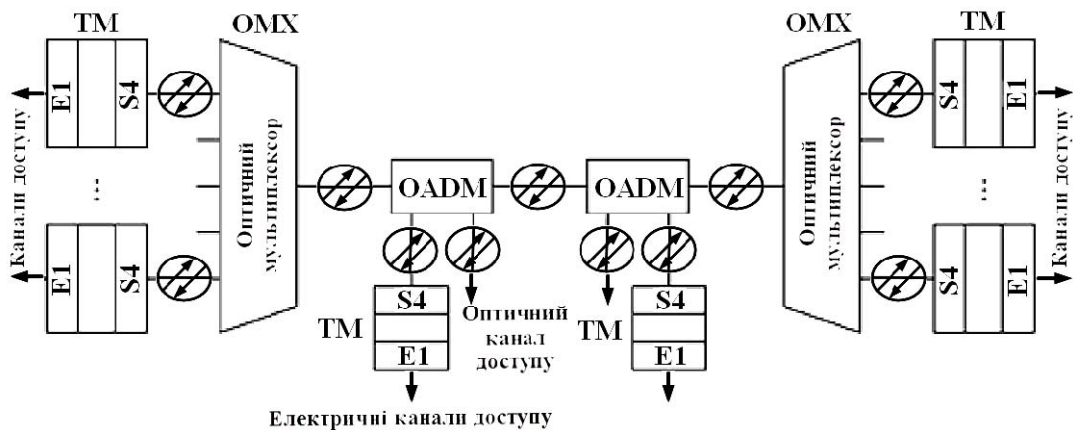


Рисунок 1.8 – Узагальнена структура ОТМ типу «лінійна ланка» на основі OADM

В цій структурі проміжні оптичні мультиплексори виконані на основі волоконних брегівських решіток (оптичних фільтрів), тобто пасивних пристроїв, які налаштовано на фіксовані хвилі в кількості (2, 4, 8). При заміні в цій структурі SDH-мультиплексорів на ADM-мультиплексори (рис. 1.9) забезпечується можливість реалізації функції вводу/виводу ADM.

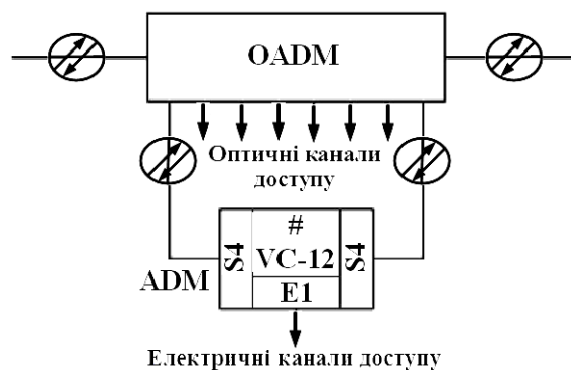


Рисунок 1.9 – Узагальнена схема проміжного мережного елемента ОТМ з доступом до оптичних та електричних каналів

Структура ОТМ типу «зірка» дає можливість концентрувати інформаційний трафік для подальшого введення в магістральну мережу (рис. 1.10). Ця структура також може бути виконана на основі xWDM-обладнання, а SDH-мультиплексори в даному випадку забезпечуються «кольоровими» агрегатними інтерфейсами (рис. 1.11).

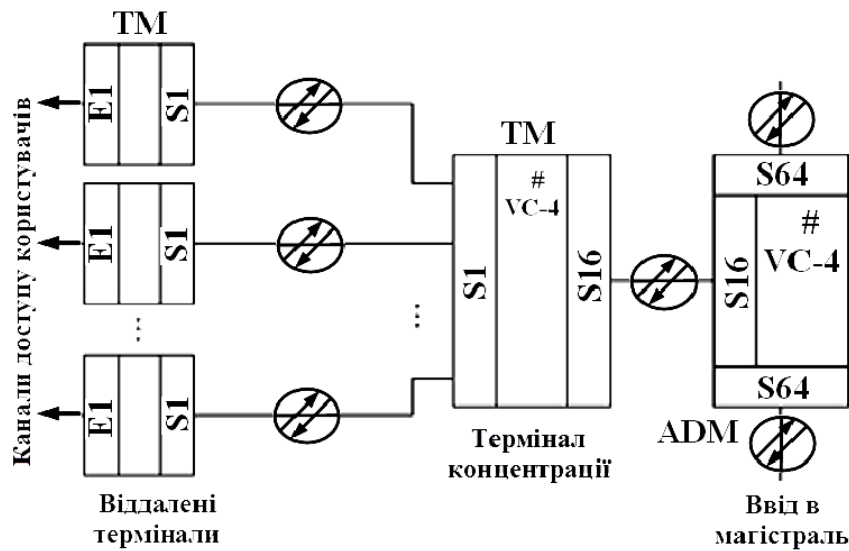


Рисунок 1.10 – Узагальнена структура ОТМ типу «зірка»

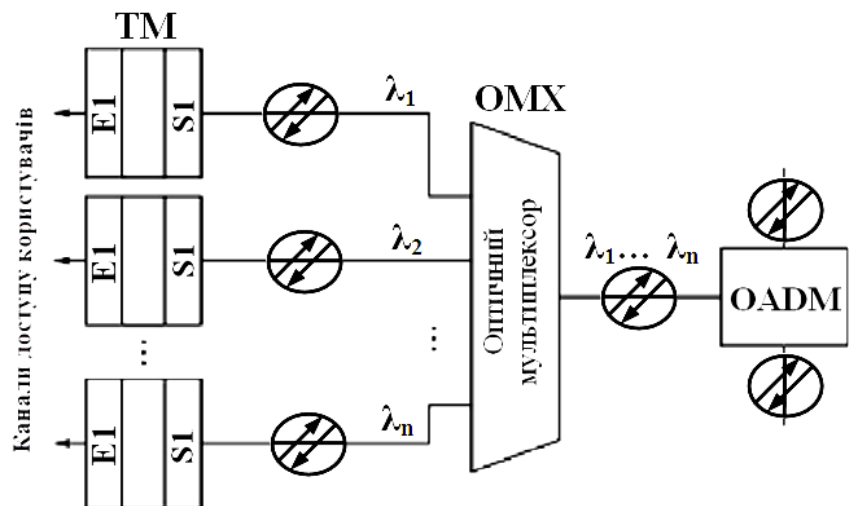


Рисунок 1.11 – Узагальнена структура ОТМ типу «зірка» на основі xWDM-мультиплексорів

В структурі «кільце» всі мережні компоненти ідентичні за агрегатними портами та об'єднанні в нерозривну замкнуту фізичну мережу згідно з топологіями: двоволоконне кільце (рис. 1.12) та чотириволоконне кільце (рис. 1.13).

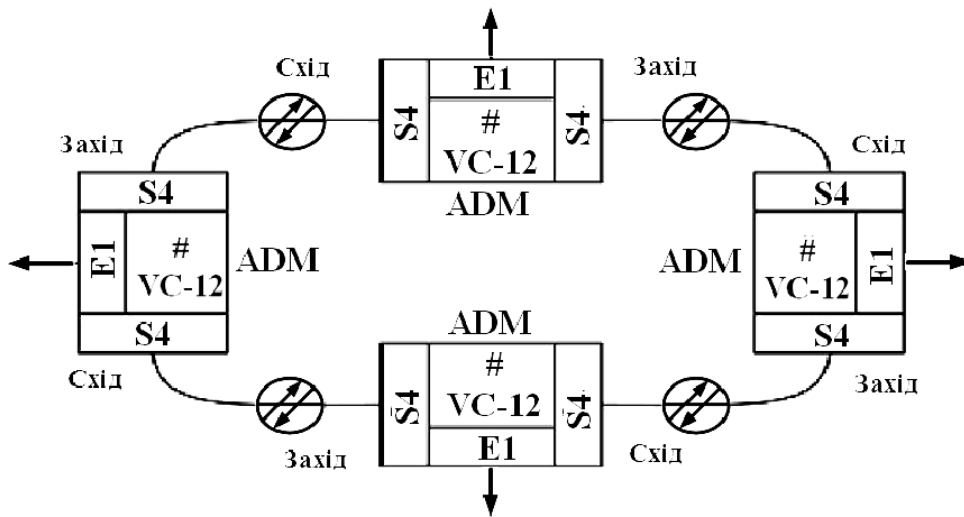


Рисунок 1.12 – Узагальнена структура ОТМ типу «двоволоконне кільце»

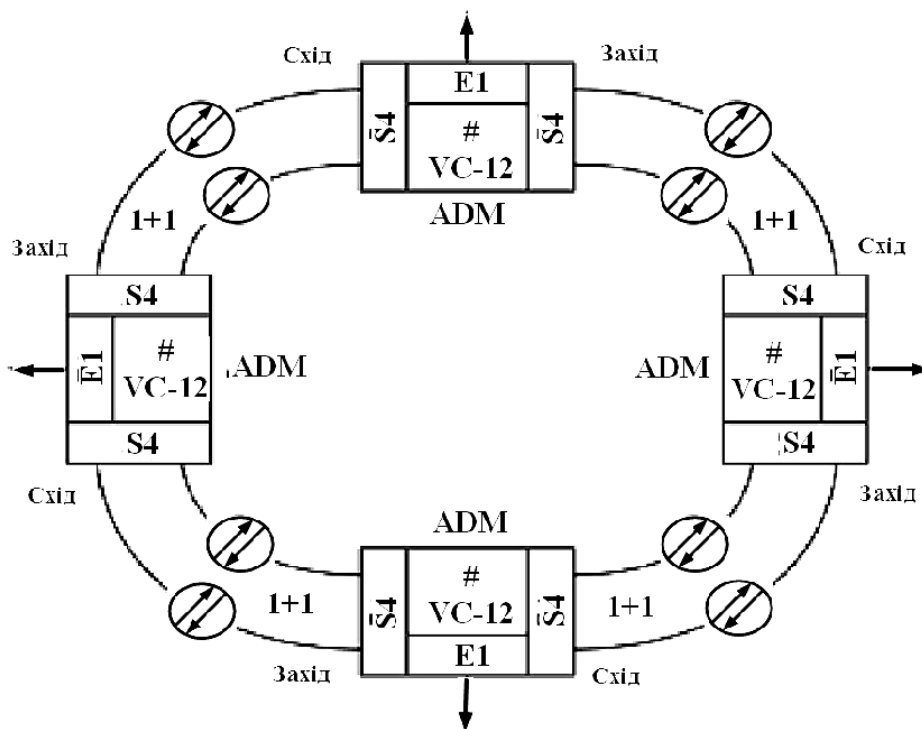


Рисунок 1.13 – Узагальнена структура ОТМ типу «чотириволоконне кільце»

Структура «чотириволоконне кільце» характеризується високою надійністю роботи за рахунок використання ефективних систем захисту.

Кільцеві топології ОТМ, в основному, використовуються на міських та зонавих мережах, а на магістральних ділянках, як правило, використовується структура «комірка». В цій структурі великі мережні вузли з'єднуються за правилом кожен з кожним, захищеними магістралями та топологією «точка – точка» (рис. 1.14). На рисунку 1.14 показано приклад двокоміркової структури транспортної мережі.

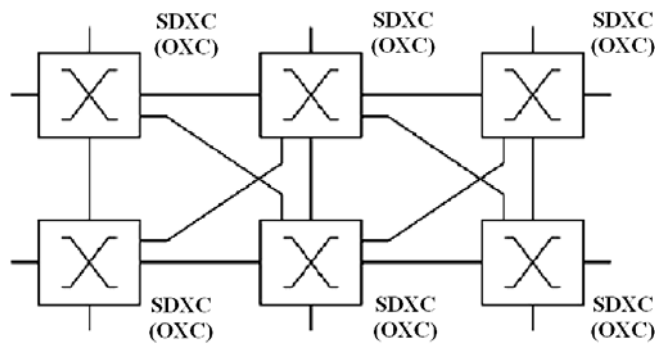


Рисунок 1.14 – Приклад структури комірок цифрової оптичної транспортної мережі

Функції вузлів в такій ОТМ можуть виконувати синхронні цифрові кросові комутатори (SDXC) або оптичні кросові комутатори (OXC), які можуть входити до складу автоматичної комутаційної оптичної мережі (ASON).

На практиці, в основному, ОТМ будуються за змішаними структурами, а саме: «кільце – лінійна ланка», «кільця, що перетинаються» та «ланки кілець».

При цьому, для узгодження різних топологій, використовуються вузли кросової комутації електричних та оптичних каналів, які дозволяють підтримувати фізичні з'єднання каналів та логічні зв'язки (маршрути, віртуальні шляхи, віртуальні канали).

Принцип однонаправленого та двонаправленого з'єднань широко використовується в кільцевих мережах. На рисунку 1.15 показано схеми однонаправленого та двонаправленого з'єднань в кільцевій ОТМ, які забезпечують потенційний резерв, що може бути використаний для організації системи захисту.

Наведені способи організації з'єднань в ТМ регламентовані в стандартах G.841, G.842, G.784, G.803 і використовуються для передавання та захисту електричних й оптичних сигналів.

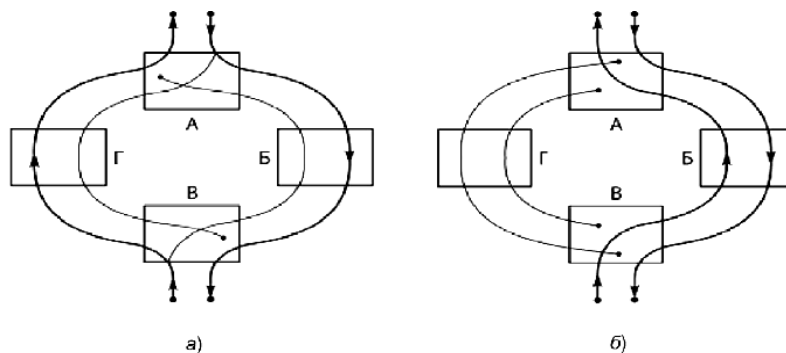


Рисунок 1.15 – Узагальнені схеми здійснення з'єднань в кільцевій ОТМ:

- а) з однонаправленим передаванням;
- б) з двонаправленим передаванням

### 1.3 Особливості будови ОТС

Основні принципи побудови ОТС показано на рисунку 1.16 на прикладі узагальненої схеми оптичної системи передавання, в якій блоками відображені можливі типи обладнання ОТС.

В ОТС широкого застосування набули оптичні мультиплексори xWDM та цифрові мультиплексори технологій PDH, SDH, ATM.

В ОТС як ВОЛЗ, в основному, використовуються скляні волоконні світловоди, які забезпечують малі втрати оптичної потужності та низькі спотворення сигналів.

Принципи побудови цифрової ОТС ОТІ реалізовано на апаратному рівні за допомогою інформаційних структур, які використовуються відповідно до функціональних вузлів.

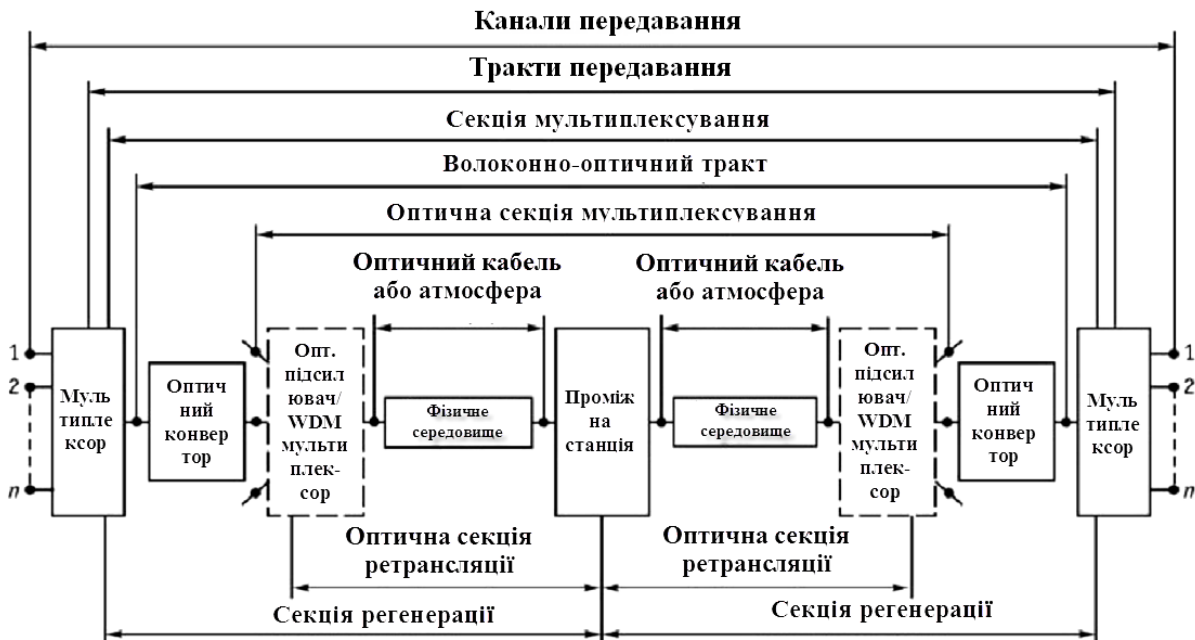


Рисунок 1.16 – Узагальнена структурна схема ОТС

ОТС ОТІ складається з набору цифрових стандартизованих інформаційних структур, які забезпечують транспортування адаптованого відповідним чином інформаційного трафіка. Тому основними інформаційними структурами ОТС ОТІ є:

- блок інформаційного трафіка ОКн (OPUk);
- блок даних ОКн (ODUk);
- транспортний блок ОКн (OTUk).

Рівень ОТІ ( $k = 1, 2, 3, 4$ ) визначає максимальну швидкість передавання сигналу в ОКн та оптимізує структуру ОТС шляхом введення 4 діапазонів швидкостей передавання:

- OPU1, ODU1, OTU1 – діапазон швидкості до 2,5 Гбіт/с;

- OPU2, ODU2, OTU2 – діапазон швидкості до 10 Гбіт/с;
- OPU3, ODU3, OTU3 – діапазон швидкості до 40 Гбіт/с;
- OPU4, ODU4, OTU4 – діапазон швидкості до 100 Гбіт/с.

В блоках інформаційного трафіка ОКн OPUk розміщується інформаційне навантаження різного формату: комірки АТМ, кадри Ethernet, пакети IP, транспортні модулі SDH, структури мультиплексування ODU та інші типи цифрових каналів.

ОВ можна класифікувати двома способами: за матеріалом волокна і показником заломлення в осерді та модовою структурою світла. Скло, що використовується при виробництві ОВ складається з надчистого і надпрозорого синтетичного діоксиду кремнію та плавленого кварцу з додатково внесеними домішками. Відповідно до даної класифікації створено три типи ОВ: багатомодове ОВ із ступінчатим профілем показника заломлення; багатомодове ОВ із згладженим профілем (градієнтне ОВ); одномодове ОВ із ступінчатим профілем.

Параметри кожного з цих типів ОВ визначаються умовами їх використання. Найбільш простим та поширеним типом ОВ є багатомодове ОВ із ступінчатим профілем, яке виготовлене із скла або пластику. В такому ОВ присутній процес розпливання імпульсів в часі, який називають модовою дисперсією. Модова дисперсія (МД) виникає в результаті взаємодії сигналів з різною довжиною траєкторій, які відповідають різним модам ОВ. В одномодовому ОВ забезпечується низьке значення МД за рахунок зменшеної серцевини, яка ефективно пропускає лише одну моду. Але параметри одномодової системи передавання обмежені можливостями обладнання ЦСП, а не волокна.

**Приклад.** Необхідно визначити коефіцієнт затухання одномодового ОВ на довжині хвилі 1620 нм (без врахування втрат за рахунок домішок).

**Крок 1.** Визначимо значення затухання сигналу в ОВ за рахунок релєївського розсіювання:

$$\alpha_p = \frac{0,7}{\lambda^4} = \frac{0,7}{1,62^4} = 0,102 \left( \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right).$$

**Крок 2.** Визначимо значення затухання зумовленого втратами в інфрачервоному діапазоні згідно з формулою:

$$\alpha_{\text{ич}} = \text{dec} \left( -\frac{21,9}{\lambda} + 12,4 \right) = \text{dec} \left( -\frac{21,9}{1,62} + 12,4 \right) = 0,076 \left( \frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right).$$

**Крок 3.** Визначимо значення затухання зумовленого втратами в ультрафіолетовому діапазоні згідно з виразом:



$$\alpha_{\text{yf}} = \frac{\text{dec}\left(\frac{2}{\lambda}\right)}{2154} = \frac{\text{dec}\left(\frac{2}{1,62}\right)}{2154} = 0,008 \left(\frac{\text{дБ}}{\text{км}}\right).$$

**Крок 4.** Визначимо сумарне значення затухання сигналу в ОВ:

$$\alpha_{\text{сум}} = 1,25(\alpha_{\text{p}} + \lambda_{\text{ич}} + \lambda_{\text{yf}}) = 1,25(0,102 + 0,076 + 0,008) = 0,233 \left(\frac{\text{дБ}}{\text{км}}\right).$$

Вказані типи ОВ значно відрізняються за якістю (шириною смуги пропускання, інформаційною ємністю, втратами) та фізичними властивостями (низька вартість). Відповідно до вказаних якісних показників ОВ необхідно розглядати в такому порядку: одномодові, градієнтні, ОВ із ступінчатим профілем, пластикові.

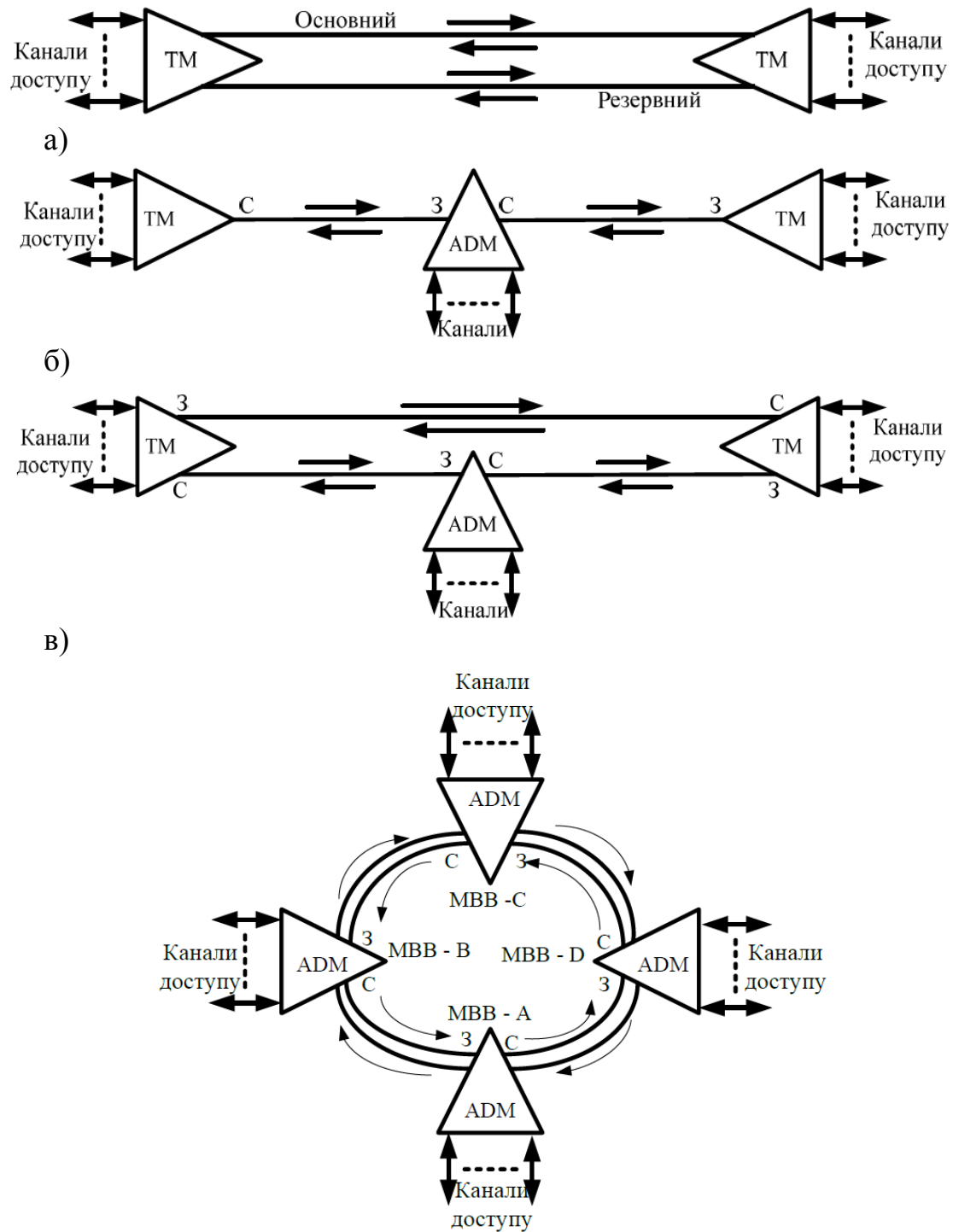
#### 1.4 Особливості визначення рівня ієрархії ОТС

При проектуванні транспортних мереж СЦІ необхідно в першу чергу виконати вибір топології та архітектури мережі. Розглянемо базові топології цих ОТМ. Найбільш простою є топологія «точка – точка» (рис. 1.17, а), яка реалізується з використанням двох термінальних мультиплексорів та двох трактів: основного та резервного. При відмові основного тракту автоматично здійснюється перехід на резервний.

За необхідності виділення каналів у проміжних пунктах застосовується топологія «послідовне лінійне коло», яка може бути подана без резервування (рис. 1.17, б) та з резервуванням типу 1+1 (рис. 1.17, в). В проміжних пунктах використовуються мультиплексори введення – виведення (ADM).

Широко використовується для побудови мереж СЦІ топологія «кільце», для організації якої може бути використано два або чотири ОВ (рис. 1.17, в). Перевагою цієї топології є легкість застосування захисту 1+1 завдяки наявності у синхронних мультиплексорах двох пар (основної та резервної) оптичних агрегатних виходів: схід – захід, які дають можливість формування подвійного кільця із зустрічними потоками.

Архітектурні розв'язання при проектуванні ОТМ СЦІ формуються на основі топологій як окремі сегменти. Часто використовується сполучення топологій «кільце» та «точка – точка» або «кільце» та «послідовне лінійне коло» (рис. 1.18, а).



г)

Рисунок 1.17 – Структурні схеми базових топологій ОТМ СЦІ:

а – «точка – точка»; б – «последовательное линейное кольцо»;

в – «последовательное линейное кольцо» типу «сплющенное кольцо»; г – «кольце»

В «кольці» використовуються синхронні мультиплексори більшого рівня ієрархії ніж на відгалуженнях. Другою архітектурою, яка часто використовується, є «кольце – кільце» (рис. 1.18, б). Комбінація топологій дозволяє формувати архітектуру складних розгалужених ОТМ СЦІ.

При проектуванні ОТМ СЦІ розробляється мультиплексний план.

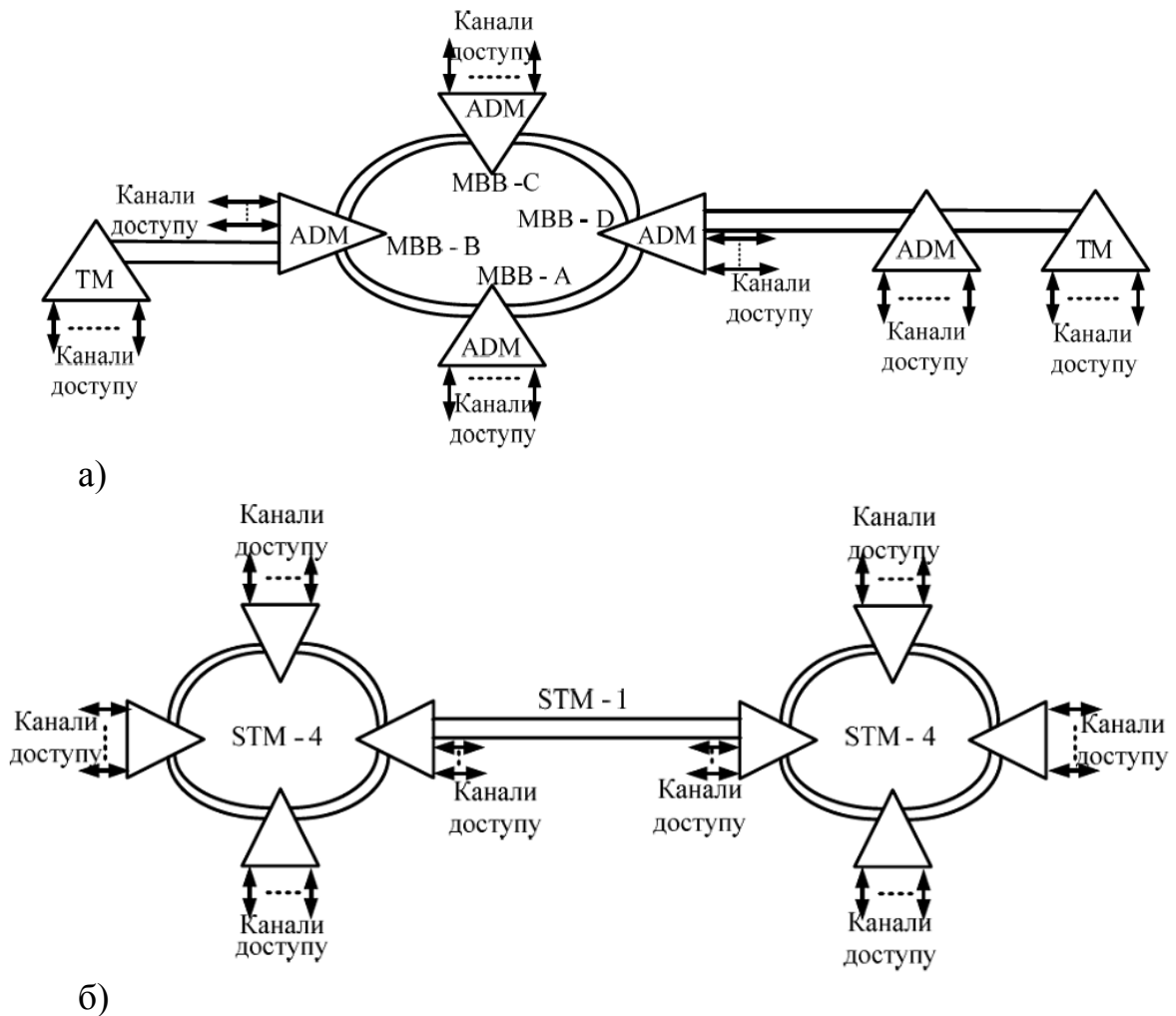


Рисунок 1.18 – Структурні схеми сполучених топологій ОТМ СЦІ:  
а – радіально-кільцева; б – «кільце – кільце»

**Приклад.** Прийmemo, що архітектура ОТМ радіально-кільцева (рис. 1.19). В цій мережі реалізується двоспрямоване кільце з чотирма ОВ, що забезпечує високу надійність та дозволяє реалізовувати гнучкі схеми резервування. На відгалуженні в пункт Д застосовано два ОВ. Захист в кільці MS Spring є захистом маршрутів потоку даних на основі розділення ресурсів в кільці.

Розподіл первинних цифрових потоків E1 між мережними вузлами наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Розподіл ПЦП між мережними вузлами

Мережні вузли	МВВ-А	МВВ-Б	МВВ-В	МВВ-Г	МВВ-Д
МВВ-А		70	45	50	13
МВВ-Б			55	35	15
МВВ-В				30	12
МВВ-Г					17
МВ-Д					

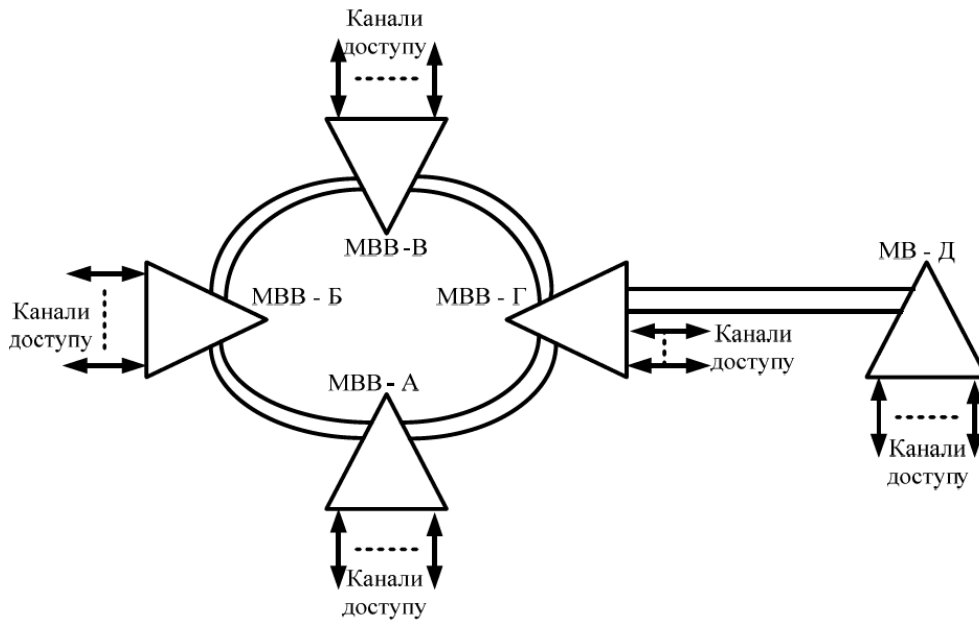


Рисунок 1.19 – Структурна схема радіально-кільцевої ОТМ СЦІ

Розробимо мультиплексний план для проектованої мережі. При побудові мультиплексного плану (рис. 1.20) «розриваємо» кільце в MBV-Г та використовуємо дані таблиці 1.3. Розраховуємо сумарну кількість ПЦП на кожній секції: АБ – 115 Е1; БВ – 150 Е1; ВГ – 92 Е1; ГД – 57 Е1; ГА – 63 Е1. Потім необхідно визначити кількість виділених ПЦП в: п. А – 178 Е1; п. Б – 175 Е1; п. В – 142 Е1; п. Г – 132 Е1.

При визначенні рівня ієрархії мережі враховується кількість ОВ, метод захисту та кількість цифрових потоків. Рівень ієрархії ОТС СЦІ потрібно вибирати таким, щоб забезпечити надійне функціонування мережі як при нормальному стані, так і після аварії.

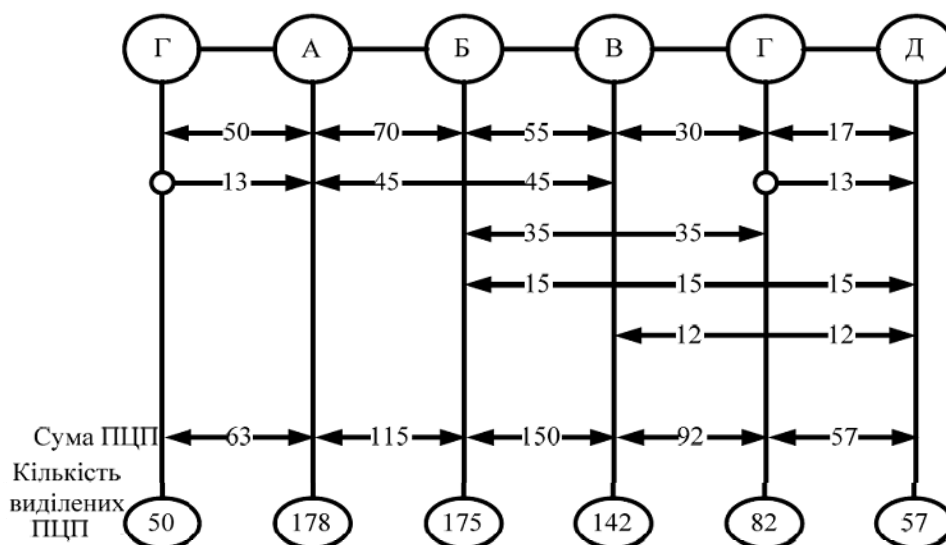


Рисунок 1.20 – Мультиплексний план радіально-кільцевої ОТМ СЦІ

Відомо, що при застосуванні методу захисту MS Spring на чотирьох ОВ два ОВ використовуються для передавання робочого трафіка та два на резерв. У нормальному режимі трафік передається по робочих ОВ.

Резервування мультиплексної секції (MSP) оснований на надлишковості апаратури, ОВ та операції переключення: у випадку пошкодження робочого тракту сигнал стає досяжним по резервному.

Функція MSP може здійснювати переключення в одному напрямку передавання (рис. 1.21, а) або в обох напрямках передавання (рис. 1.21, б). При односпрямованому переключенні здійснюється перехід на резервний тракт тільки в пошкодженому напрямку передавання. При двоспрямованому переключенні здійснюється перехід на резервну секцію в обох напрямках.

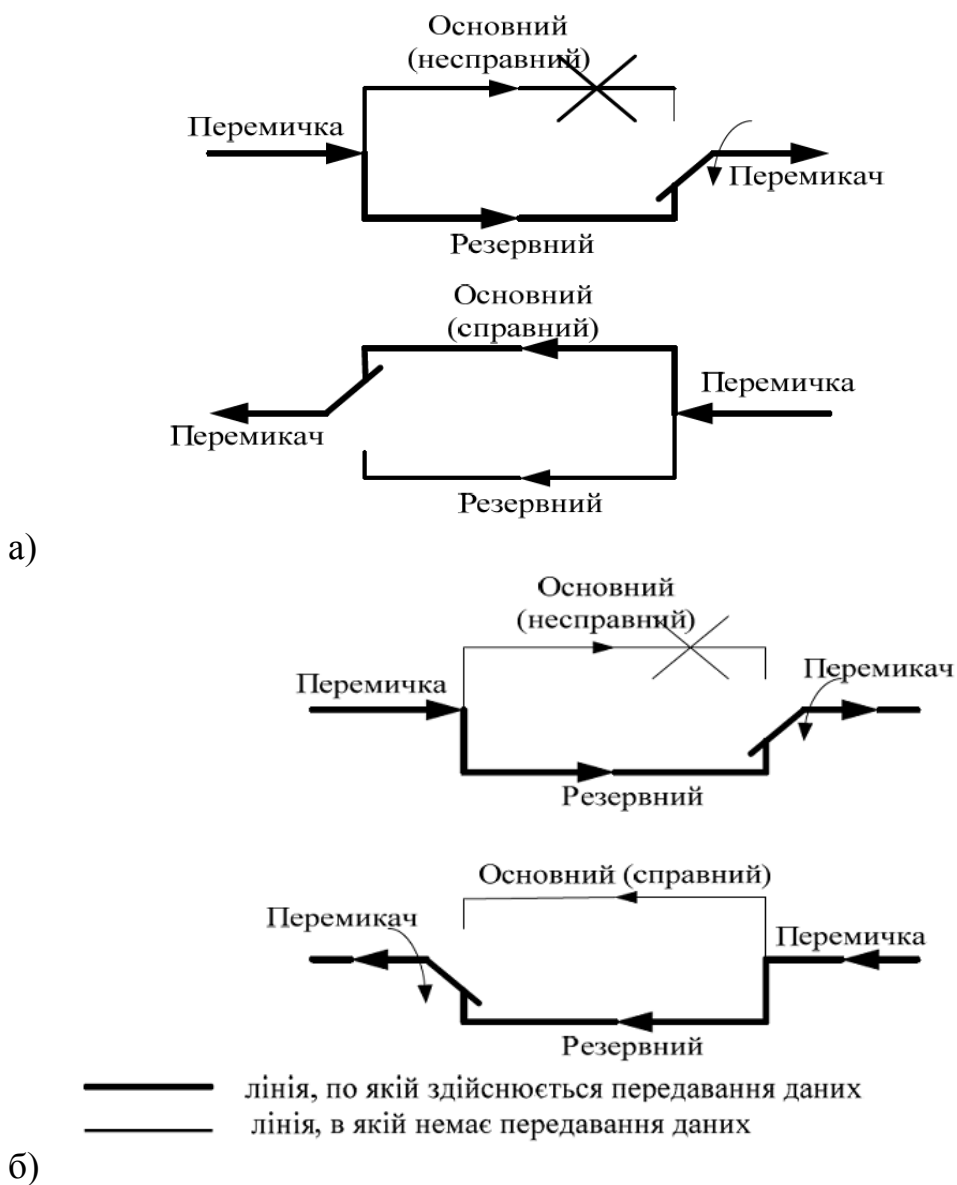


Рисунок 1.21 – Структурні схеми переключення обладнання ОТС СЦІ на резервний тракт: а – односпрямоване; б – двоспрямоване

Потрібно відмітити, що в ОТМ СЦІ радіально-кільцевої топології широко застосовується схема захисту з розподіленням ресурсів каналів типу MS Spring. Цей метод захисту базується на розподіленні ресурсів кілець як з двома, так і з чотирма ОВ. Особливістю захисту MS Spring є те, що для передавання трафіка використовуються всі ОВ, однак тільки 50 % ємності кожного ОВ віддано під трафік та 50 % під трафік захисту. Припустимо, що на одній з ділянок розірвано оптичний кабель. При цьому пошкодженні на одному кінці здійснюється переключення з робочої пари на резервну, а на другому з резервної на робочу. Таким чином організується обхід пошкодженої ділянки.

Рівень ієрархії в кільці визначається ділянкою з максимальною кількістю ПЦП. В даному випадку це ділянка Б-В, на якій необхідно забезпечити передавання 150 ПЦП. Оскільки

$$63E1 < 150E1 < 252E1,$$

тому використовуємо ОТС рівня STM-4.

На відгалуженні потрібно організувати 57 ПЦП ( $57E1 < 63E1$ ), застосувавши ОТС рівня STM-1.

Необхідно відзначити, що при використанні методу MS Spring на двох ОВ є відмінність у визначенні рівня ієрархії мережі. В цьому випадку в кожному ОВ ресурси між робочими та захисними каналами розподіляються приблизно порівно, щоб при аварії на будь-якій ділянці робочий трафік можна було переключити на захисні канали. Для визначення рівня ієрархії ОТС за мультиплексним планом (рис. 1.20) потрібно визначити суму двох найбільш завантажених ділянок:  $150 + 115 = 265$  ПЦП. Тому, що  $252E1 < 265E1 < 1008E1$ , потрібно використати ОТС рівня STM-16.

Таким чином, при розподілі ПЦП між мережними вузлами, наведеному в таблиці 1.3, при застосуванні методу захисту MS Spring на чотирьох ОВ використовується обладнання STM-4, а в двоволоконному – STM-16. На відгалуженні в обох випадках передається потік рівня STM-1.

## 1.5 Технології захисних переключень в ОТМ

Схеми захисту ОТМ забезпечують захист обладнання лінійного тракту (секцій мультиплексування), з'єднань (тракту високого або низького порядку, оптичних каналів, віртуальних з'єднань при пакетному передаванні) та обладнання.

Система захисту секцій мультиплексування забезпечує захист лінійного тракту за рахунок використання резервного кабелю та обладнання. Цей тип захисту може бути двох варіантів, а саме:

- (1+1) – робоча секція мультиплексування безперервно дублюється резервною секцією мультиплексування, при аварії робочої секції здійснюється перехід на резервну секцію;

- (1:1) – робоча секція мультиплексування може бути продубльована в аварійному стані резервною секцією, яка при нормальному режимі задіяна

для передавання додаткового інформаційного трафіка і який автоматично скидається при аварії основної робочої секції.

Причинами (ознаками) спрацювання системи захисного переключення в секції мультиплексування обладнання STM-N можуть бути такі сигнали:

- втрата сигналу на прийомі (LOS);
- втрата циклу STM-N (LOF);
- перевищення коефіцієнта бітових помилок ( $BER > 10^{-10}$ ).

Оскільки, передавання лінійних сигналів в обладнанні STM-N може здійснюватись по одній або двох паралельних системах, можливі два варіанти захисних переключень: синхронізований та несинхронізований.

Для захисту секції оптичного мультиплексування WDM OMS передбачається розподіл та передавання потужності багатохвильового WDM-сигналу в різних ОВ (різних ВОЛЗ) (рис. 1.22). На стороні прийому оптичний комутатор забезпечує швидку зміну напрямку прийому оптичного сигналу.

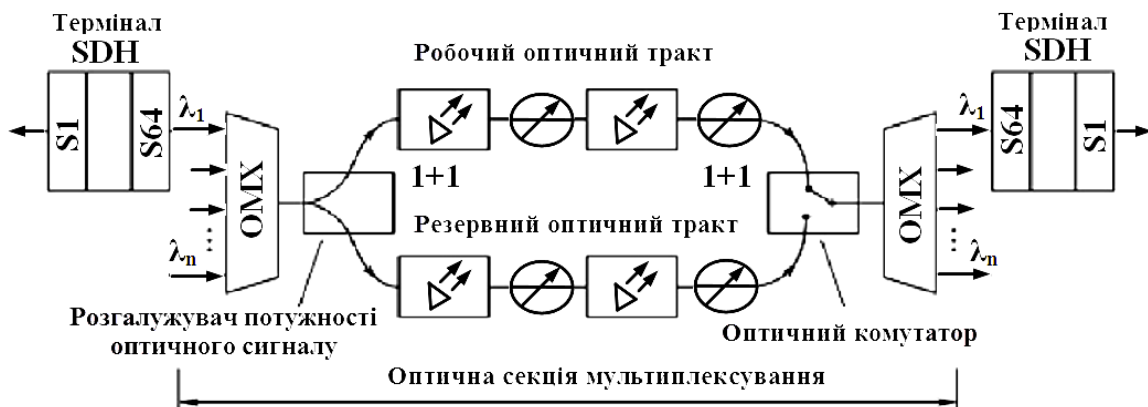


Рисунок 1.22 – Узагальнена схема захисту секції оптичного мультиплексування

Потрібно відмітити, що в ОТМ можлива реалізація додаткової електронної схеми захисного переключення з використанням байтів керування APS в заголовку ODUk (рис. 1.23).

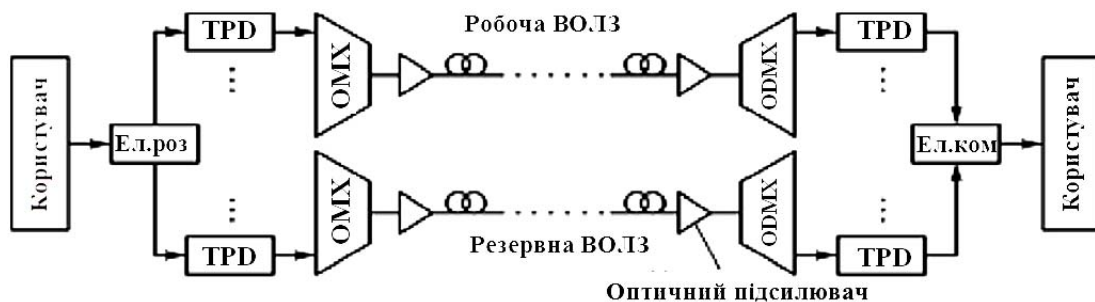


Рисунок 1.23 – Узагальнена схема електричного захисту в ОТМ

Електричний розгалужувач сигналу користувача ділить сигнал між окремими каналами, що організовані за допомогою транспондерів, оптичних мультиплексорів та демультимплексорів, а електричний комутатор забезпечує вибір найкращого сигналу на прийомі.

Для захисних переключень xWDM-каналів в ОТМ використовуються фотонні комутатори, які характеризуються різними конструкціями та параметрами. В ОТМ з оптичною комутацією та комутацією пакетів динамічний захист є невід'ємною функцією, для реалізації якої на рівні каналів та трактів необхідне використання швидкодіючих комутаторів та частотних селекторів WSS, які забезпечують комутацію хвильових каналів за напрямками (маршрутами) та підтримують виділення, ввід хвильових каналів та регулюють рівень їх потужності (рис. 1.24).

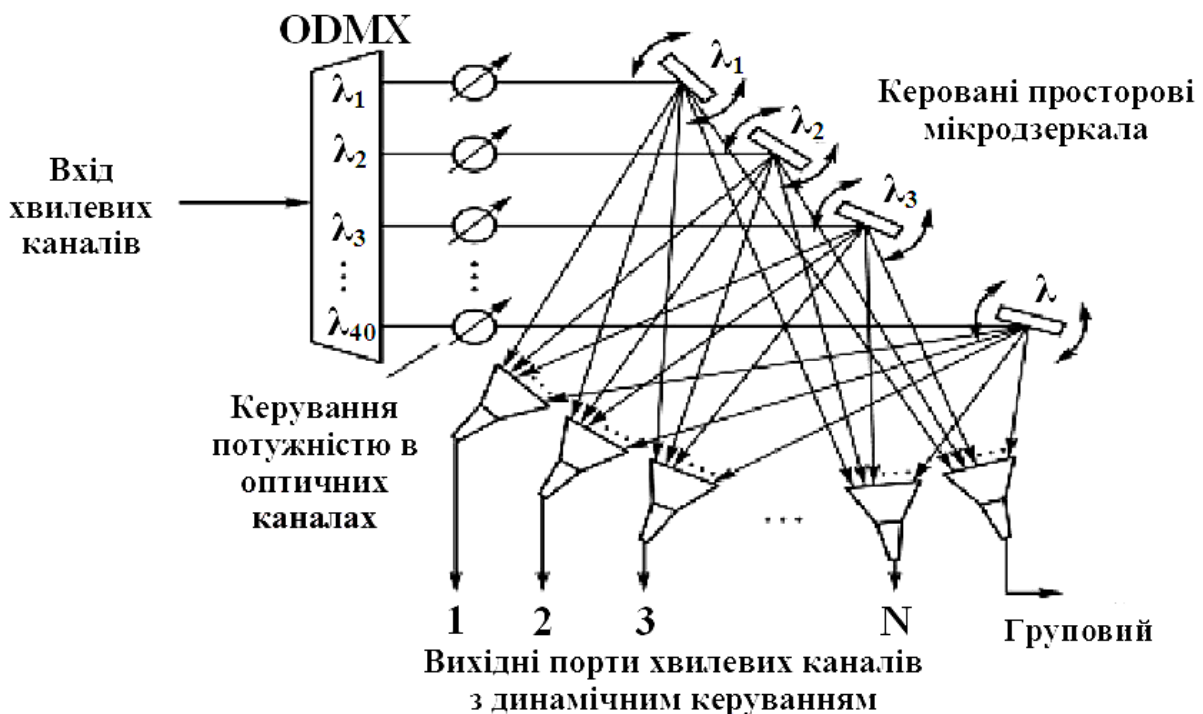


Рисунок 1.24 – Будова динамічно керованого частотного селектора-комутатора

Використання обладнання WSS спільно з оптичними мультиплексорами та демультимплексорами дозволяє будувати вузли виділення/вводу з захистом окремих хвильових каналів, груп хвильових каналів (оптичних модулів), маршрутів (трактів) та секцій мультиплексування і передавання.

Для захисту цифрових потоків на мережному рівні, в основному, використовується захист оптичного каналу ОСНР за схемою 1+1 за допомогою Y-кабелю на рівні клієнтського порту транспондера. Цю схему захисту оптичного каналу наведено на рисунку 1.25.



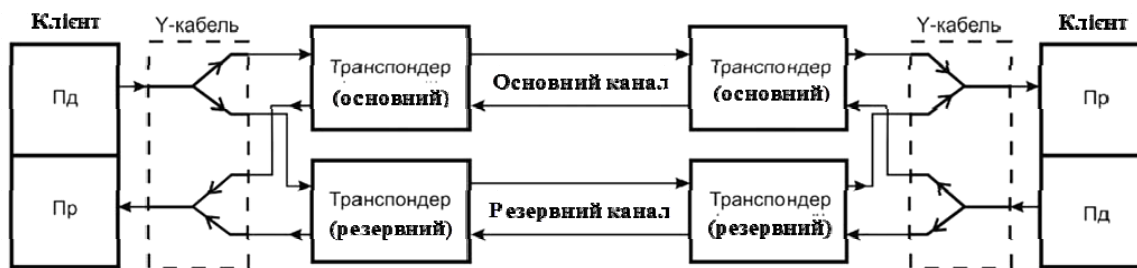


Рисунок 1.25 – Узагальнена структурна схема захисту оптичного каналу ОЧНР за схемою 1+1

Для організації захисту створюється резервна група з двох плат ТХР, МХР або 10GE\_XP. При цьому порт передавання клієнтського обладнання фізично з'єднується з двома платами транспондерів за допомогою Y-кабелю. В результаті один і той же клієнтський сигнал одночасно передається в основному та резервному оптичних каналах.

В лінійних портах на прийомі здійснюється контроль якості передавання в обох каналах та, у випадку виникнення пошкодження або відмови основного каналу, виконується переключення на резервний канал. При цьому включається лазер клієнтського передавача резервної плати транспондера.

Процес переключення оптичного каналу може бути активований при виконанні будь-якого з таких критеріїв автоматичного захисного переключення:

- LOS-P – відсутність лінійного сигналу на прийомі;
- OTUk-LOF – втрата циклової синхронізації;
- OTUk-SF – перевищення коефіцієнта помилок в оптичному каналі;
- OTUk-SD – погіршення якості сигналу в оптичному каналі.

Автоматичне керування захисним переключенням здійснюється процесором плати TCC2, який безперервно контролює основний та резервний канали та у випадку виконання критерію захисного переключення процесор активізує процес переключення інформаційного трафіка з основного каналу на резервний.

## 1.6 Технології оптичних мереж доступу

На оптичних мережах доступу можуть використовуватися такі технології:

- мікро-мережа SDH (Micro-SDH);
- активні мережі Ethernet (AE, EFMF);
- пасивні оптичні мережі (PON);
- гібридні волоконно-коаксіальні мережі (HFC).

При побудові мережі доступу мікро-SDH зазвичай використовують топологію «кільце» (рідше «точка – точка» або «лінійне коло») (рис. 1.26).

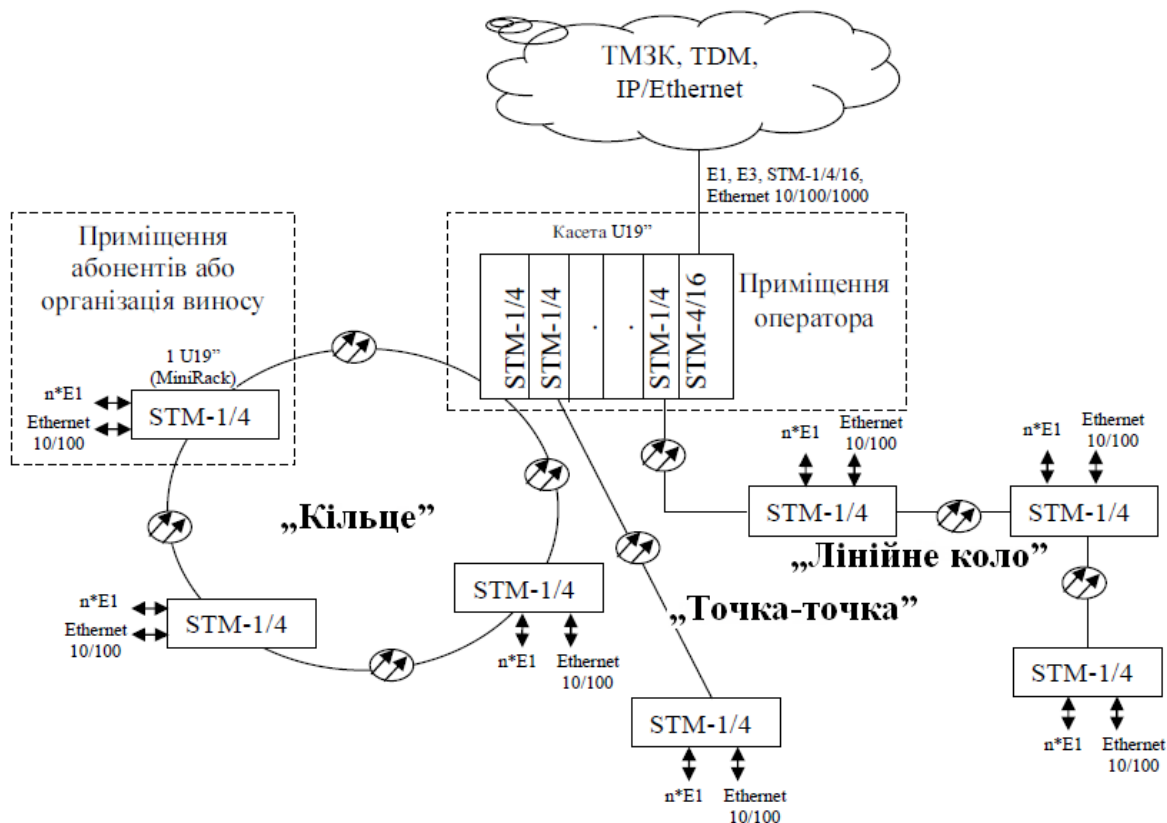


Рисунок 1.26 – Будова ОМД на базі технології мікро-SDH

Застосування технології мікро-SDH є доцільним у таких випадках. Бізнес-сектор, де є потреба у передаванні TDM-трафіка, тобто наданні доступу по цифрових потоках E1, E3, STM-1 та паралельно з цим потрібно організувати підключення локальних мереж по Ethernet 10/100 Мбіт/с – при цьому застосовується варіант будівництва оптичної мережі FTTO, тобто обладнання мікро-SDH розміщується у приміщенні корпоративних абонентів, що спрощує організацію електроживлення та захист від несанкціонованого доступу до обладнання. Побудова оптичної мережі при модернізації існуючої або побудові нової телефонної мережі загального користування на базі виносних модулів комутації та DSLAM, зв'язок між якими забезпечується через обладнання мікро-SDH.

В оптичних активних Ethernet-мережах застосовуються топології «точка – точка» або «дерево з активними вузлами», що відповідає концепції будівництва мереж Ethernet EFMF. На рисунку 1.27 зображені типові схеми застосування технології Ethernet.

Обов'язковим елементом цієї архітектури ОМ є центральний агрегуювальний вузол (потужний Ethernet-комутатор) з оптичними інтерфейсами згідно з специфікацією 802.3ah, до яких безпосередньо може підключатися користувач за топологією «точка – точка».

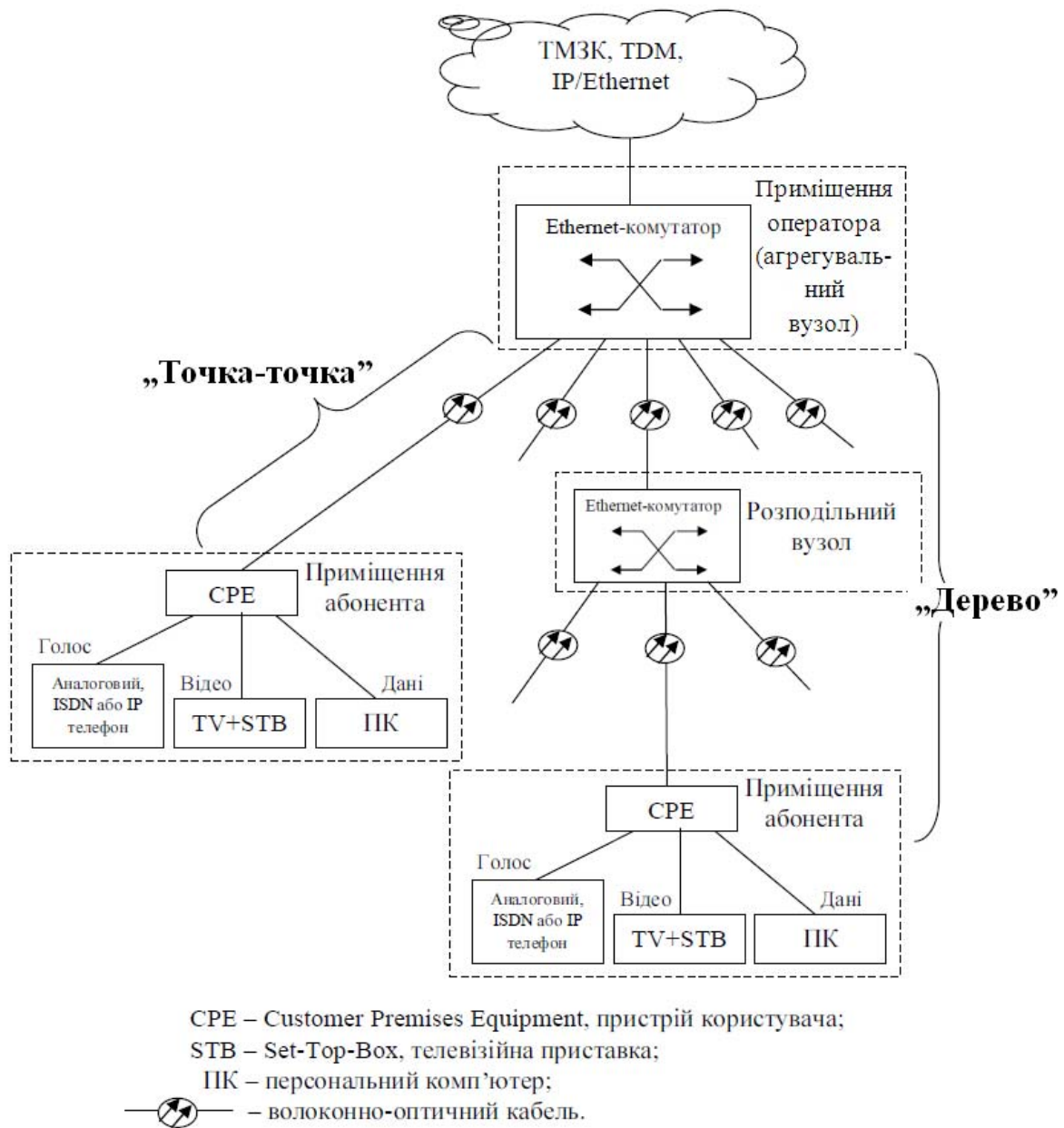
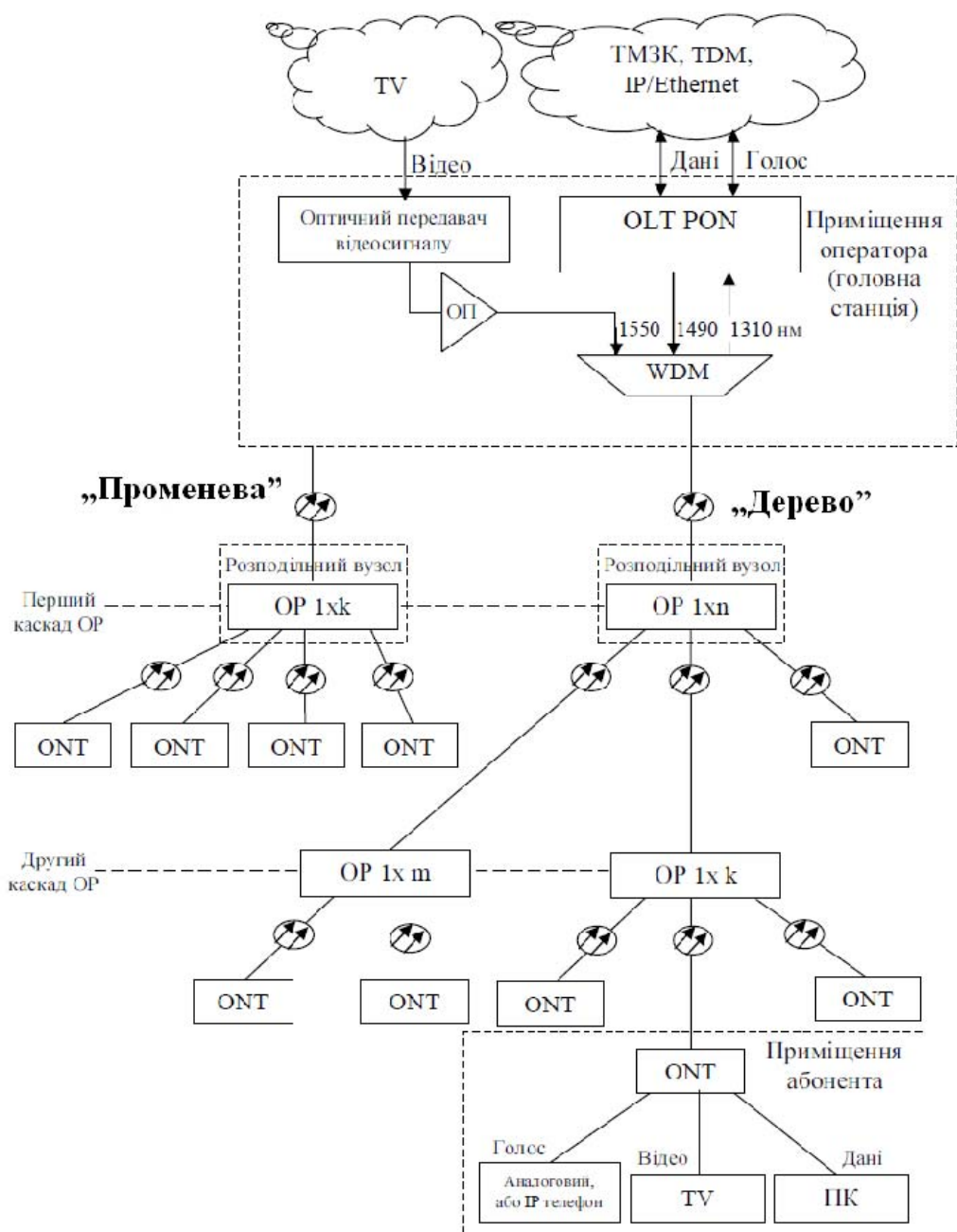


Рисунок 1.27 – Будова ОМД на базі Active Ethernet-технології

Практика побудови цих мереж доступу показала, що активні Ethernet-мережі є найбільш ефективними, в основному, за варіантом доступу FTTB та за варіантом FTTO при підключенні корпоративних абонентів, які вимагають організації виділених оптичних ліній; також доцільно застосовувати Ethernet-мережі за технологією FTTC для підключення до мережі DSLAM з вбудованими Ethernet-комутаторами.

Однією з важливих переваг пасивних ОМД (PON) є можливість надання споживачу всіх послуг (телефонії, інтернету та телебачення) по одному ОВ за допомогою більш гнучких можливостей використання ресурсу пропускної здатності ОВ. На відміну від активних мереж, технологія PON пе-

редбачає створення розгалуженої мережі (переважно топології «дерево», іноді «зірка» або «променева») без активних компонентів – на пасивних оптичних розгалужувачах (рис. 1.28).



OLT PON – станційне обладнання технології PON;

ONT – абонентське обладнання технології PON;

ПК – персональний комп'ютер;

OP – оптичний розгалужувач;

ОП – оптичний підсилювач;

WDM – спектральний мультиплексор;

— (символ кабелю) — волоконно-оптичний кабель.

Рисунок 1.28 – Будова ОМД на базі PON технології

У сімействі технологій PON існує кілька різновидів, що відрізняються, в першу чергу, базовим протоколом передавання. На даний час широко застосовується дві технології: GPON за рекомендацією G.984 та GEPON за стандартом IEEE 802.3ah.

Порівняння цих технологій показує, що кожна з них має свої переваги та недоліки. Технологія GEPON орієнтована на IP-трафік, тому виникають складнощі при взаємодії з іншими технологіями (в першу чергу при передаванні TDM-трафіка), у той час як технологія GPON підтримує стандартний TDM-трафік. З іншого боку, GPON має складну рівневу систему Ethernet/GEM/GTC інкапсуляції, що ускладнює управління, а у GEPON передаються вихідні Ethernet-пакети, що визначає просте і недороге управління. GPON має більшу швидкість передавання та більший енергетичний потенціал.

Технологія PON – це рішення операторського класу, її переваги порівняно з активними мережами починають виявлятися при реалізації великих проектів, коли кількість ONT перевищує кілька тисяч.

### 1.7 Принципи побудови оптичних мереж доступу

Оптичні мережі доступу (ОМД) поділяються на 2 категорії: загального використання та корпоративного.

Згідно з рекомендацією G.983 ОМД базується на гібридній архітектурі ТМ, в якій цифрові оптичні інформаційні потоки від оптичних лінійних закінчень (OLT) по ОК надходять в оптичні блоки мережі (ОБМ), де перетворюються в електричні сигнали та по мідних кабелях подаються користувачам. На рисунку 1.29 показано спрощений варіант топології ОМД, де СМК – стик мережі користувача, СВО – стик вузла обслуговування, FTTH, FTTB/C, FTTCab – типи ОК за призначенням.

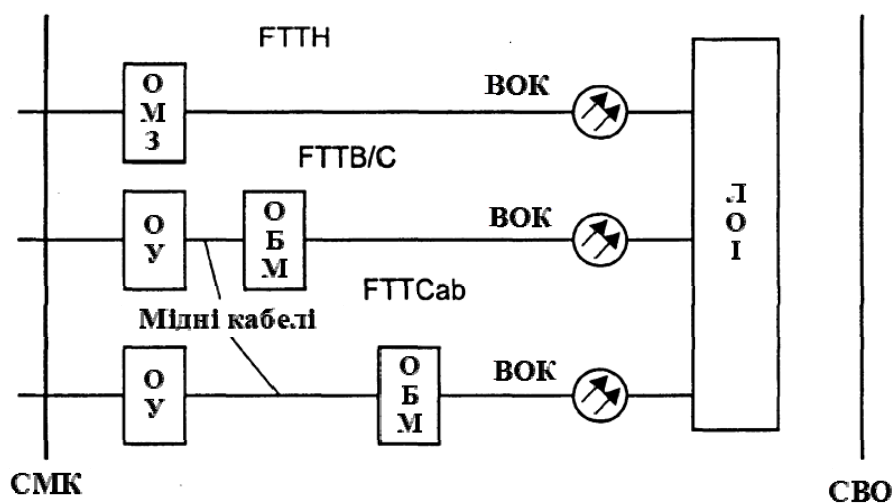


Рисунок 1.29 – Узагальнена топологія ОМД

Параметри ОКн базових ОМД:

- пропускна здатність вхідних потоків дорівнює 622 Мбіт/с (STM-4);
- пропускна здатність вихідних потоків дорівнює 155 Мбіт/с (STM-1).

Згідно з рекомендацією G.983.1 основою ОМД є пасивні оптичні мережі (ПОС або PON), які складаються з: ОК, оптичних розгалужувачів та відгалужувачів, оптичних мультиплексорів/демультиплексорів, оптичних фіксованих атенюаторів, оптичних фільтрів, ізоляторів та циркуляторів, з'єднувачів та розподільувачів.

Для підвищення пропускної здатності в ОМД використовують метод WDM, який надає їм такі переваги: гнучка реконструкція діючих вузлів зв'язку шляхом встановлення додаткових блоків без переривання зв'язку та обслуговування; спрощене проектування нових з'єднувальних ділянок ОМД; знижені вимоги до параметрів ОВ; знижені вимоги до параметрів дискретних пасивних оптичних елементів.

Згідно з рекомендацією G.694.2 в ОМД, як правило, використовується CWDM-технологія, робочий діапазон якої становить 1270–1610 нм та вміщує 16 спектральних каналів з міжканальним інтервалом 20 нм, який знижує вимоги: до стабільності оптичної частоти, значення ширини ліній випромінювання оптичних лазерів, до спектральних параметрів оптичних мультиплексорів/демультиплексорів та параметрів ОВ.

FTTx – (ОВ до точки x) припускає наявність ділянки з розподільними мідними кабелями і чим вона коротша, тим більше пропускна здатність мережі. Існує кілька варіантів реалізації FTTx (рис. 1.30):

- FTTH – волокно до квартири;
- FTTB – волокно до будівлі;
- FTTO – волокно до офісу;
- FTTC – волокно до кабельної шафи;
- FTTR – волокно до концентратора;
- FTTN – волокно до мережного вузла;
- FTTP – волокно до клієнта.

Ці варіанти можна умовно поділити на чотири групи, які характеризують ступінь проникнення ОВ на мережі доступу та відповідно довжину розподільного мідного кабелю:

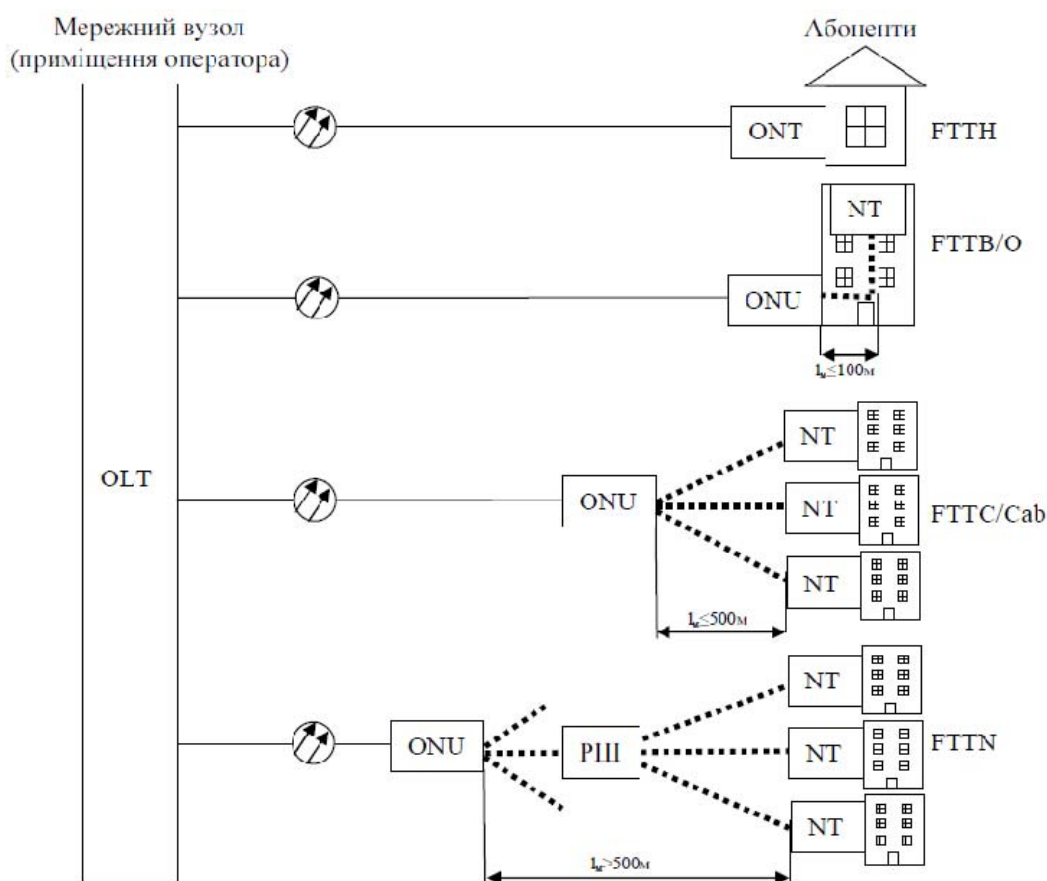
- FTTN – ОВ доведено до оптичного мережного блоку ONU, який знаходиться від терміналу клієнта на відстані понад 500 м (зазвичай, це мережний вузол місцевої транспортної мережі – приміщення комутаційної станції, в якому розміщується DSLAM);

- FTTC – ОВ доведено до оптичного мережного блоку, який знаходиться від терміналу клієнта на відстані менше 500 м (зазвичай, це розподільна шафа, точка розмежування магістральної та розподільної ділянки телефонної мережі, де розміщується виносний модуль комутації, концентратор або DSLAM);

- FTTB/O – ОВ доведено до оптичного мережного блоку, який знаходиться від терміналу клієнта на відстані менше 100 м (зазвичай, це спеціально обладнане місце в житловому будинку або офісі);

- FTTH – ОВ доведено до приміщення клієнта, тобто індивідуального терміналу клієнта ONT і тому відсутня ділянка мідної абонентської лінії (АЛ).

Варіант доступу FTTH є найбільш витратним, але у той самий час і найбільш перспективним, серед усіх типів доступу FTTx, тому що забезпечує найбільшу смугу пропускання, а тому цей варіант повною мірою може задовольнити зростаючі потреби користувачів в обміні інформацією.



OLT – Optical Line Terminal – оптичний лінійний термінал;

ONT – Optical Network Terminal – оптичний мережний термінал;

ONU – Optical Network Unit – оптичний мережний блок;

NT – Network Terminal – мережний термінал, термінальний (кіпцевий) пристрій;

РШ – розподільна шафа;

—○— – оптичний кабель; - - - - - металевий кабель.

Рисунок 1.30 – Варіанти побудови ОМД FTTx

Треба зазначити, що FTTx – це тільки фізичний рівень оптичних технологій доступу. Проте фактично дане поняття охоплює і велику кількість технологій каналного та мережного рівнів, таких як SDH, Ethernet та PON.

## 1.8 Особливості проектування ОМД

Задача проектування ОМД полягає у виконанні послідовності таких операцій:

- вибір технології FTTx;
- визначення місць встановлення модулів ONU/ONT;
- вибір топології побудови мережі, місць встановлення оптичних розгалужувачів та їх тип;
- вибір трас проходження та типу ВОК;
- розрахунок енергетичних параметрів ОМД (розрахунок бюджету втрат для кожної гілки (сегмента) мережі, визначення оптимальних коефіцієнтів розгалуження всіх оптичних розгалужувачів (ОР) та визначення класу активного обладнання PON).

На мережі може бути використана однорівнева або каскадна (багаторівнева) схема ввімкнення оптичних розгалужувачів, що визначає стратегію їх розміщення, і як результат, топологію будівництва мережі. При побудові мережі PON можуть застосовуватися дві стратегії розміщення солітерів (оптичних розгалужувачів): централізоване та розподілене.

При побудові пасивної оптичної мережі можуть використовуватися оптичні розгалужувачі двох типів, що відрізняються методом виготовлення: сплавні (FBT) та планарні (PLC). При виборі типу ОР, крім ціни та коефіцієнта ділення, потрібно враховувати ще багато факторів: значення внесених втрат потужності сигналу та їх однорідність, значення коефіцієнта спрямованості та оптичних втрат на відбиття (ORL), значення поляризаційно-залежних втрат (PDL), температурний діапазон.

Згідно з вимогами рекомендації G.983, для будівництва PON повинні використовуватися кабелі з одномодовими ОВ типу G.652 або сумісними з ними (наприклад, G.655 або G.657).

Розрахунки згасання оптичного сигналу виконуються для ВОЛЗ від точки підключення ОВ до активного обладнання головної станції до найвіддаленішого абонента, якщо у сегменті мережі застосовуються тільки симетричні оптичні розгалужувачі або для всіх абонентів, якщо будується збалансована мережа із застосуванням несиметричних ОР. В мережі PON джерелом втрат є:

- загасання в ОВ (залежить від довжини ОВ та коефіцієнта згасання на робочій довжині хвилі);
- втрати на зварних з'єднаннях (залежать від втрат у кожному з'єднанні та їх кількості);
- втрати на роз'ємних з'єднаннях (залежать від втрат у кожному конекторі та їх кількості);
- втрати на оптичних розгалужувачах (залежать від типу ОР, кількості вихідних полюсів та коефіцієнта розгалуження потужності – для ОР з нерівномірним коефіцієнтом розгалуження);
- додаткові втрати (втрати на вигини кабелів при прокладанні).



Сума всіх втрат, які виникають на ділянці оптичної мережі, являє собою енергетичний бюджет загасання. При розрахунках потрібно враховувати ще експлуатаційний запас на організацію додаткових стиків та вставок при проведенні ремонтних робіт, а також запас на природне старіння ОВ. В цілому рекомендується залишати запас бюджету лінії 1–2 дБ після повністю виконаного підключення всього тракту від OLT до ONT.

Бюджет втрат для технології GPON базується на рекомендації G.984.2 та залежить від класу активного обладнання, що використовується при будівництві мережі, відмінність обладнання цих класів полягає у потужності передавачів та чутливості приймачів. Так, згідно з цією рекомендацією, повні втрати в мережі PON залежно від класу не повинні перевищувати:

- 21 дБ для класу А;
- 26 дБ для класу В;
- 31 дБ для класу С.

Оскільки більшість обладнання GPON, що зараз виробляється, належить до класу В+, за якого оптичний бюджет лінії становить 28 дБ, при розрахунку параметрів PON логічно обмежуватись саме цим значенням втрат.

На рисунку 1.31 наведена структура лінії PON, яка дозволяє визначити бюджет втрат.

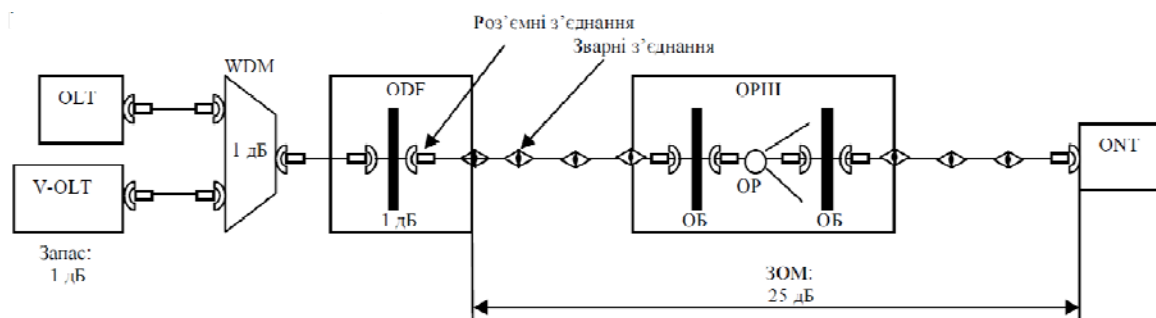


Рисунок 1.31 – Структура лінії PON для розрахунку бюджету втрат

У більшості випадків, коли радіус охоплення не перевищує 10 км та групи абонентів сконцентровані в певних зонах, великих проблем у розрахунку оптичного бюджету лінії не виникає, навіть виконуються з коефіцієнтом розподілення (1×64) умови за бюджетом втрат. Але якщо абоненти розосереджені на великій території (радіус охоплення понад 10 км), виникає питання: яким чином будувати мережу та яку максимальну кількість абонентів можливо підключити до одного сегмента (гілки, дерева) PON, щоб виконувалася умова з обмеження бюджету втрат.

**Приклад.** Вважаємо, що на попередніх етапах проектування було визначено, що сегмент мережі PON-FTTB має топологію «дерево» з двома каскадами ОП (рис. 1.32). До мережі планується підключити три групи абонентів, тому перший каскад ОП має коефіцієнт розподілення (1×3). У

кожній зоні концентрації абонентів планується підключити по 6 ONU, але з урахуванням розвитку доцільно використовувати ОР з коефіцієнтом розподілення (1×8), що дозволить у процесі експлуатації даного сегмента мережі у кожній зоні підключити ще по два ONU (точки приросту – ТП). У першій та другій зонах максимальна відстань від ОР до ONU становить 1 км, а у третій – 2 км.

Послідовність розрахунку бюджету втрат такий.

**Крок 1.** Розрахунок починається з боку абонентів (ONU) та виконується на довжині хвилі 1310 нм, де загасання сигналу найбільше. Так, при використанні кабелю з ОВ за рекомендацією G.652.D воно становить 0,35 дБ/км. Оскільки будується збалансована мережа, то розрахунок потрібно виконувати для кожної гілки «дерева» PON. На ділянках ONU – ОР-2 розрахунок здійснюється за формулою:

$$A_x = L_x \cdot \alpha + N_{pz,x} \cdot A_{pz} + N_{zz,x} \cdot A_{zz},$$

де  $L_x$  – довжина лінії від ONU-X до ОР другого каскаду;

$\alpha$  – коефіцієнт загасання на розрахунковій довжині хвилі;

$N_{pz,x}$  – кількість роз'ємних з'єднань на ділянці  $x$ ;

$A_{pz}$  – загасання одного роз'ємного з'єднання (для конекторів типу SC/APC в розрахунках можна прийняти рівним 0,2 дБ);

$N_{zz,x}$  – кількість зварних з'єднань на ділянці  $x$  (з урахуванням будівельної довжини ОК);

$A_{zz}$  – загасання одного зварного з'єднання (у розрахунках можна прийняти рівним 0,1 дБ).

Оскільки відстані від ОР до ONU невеликі, то розрахунок будемо виконувати для максимальної відстані в кожній зоні концентрації абонентів:

$$A_{1...16} \leq 1 \times 0,35 + 2 \times 0,2 + 3 \times 0,1 = 1,05 \text{ (дБ)},$$

$$A_{17...24} \leq 2 \times 0,35 + 2 \times 0,2 + 3 \times 0,1 = 1,4 \text{ (дБ)}.$$

**Крок 2.** Визначення загасання у оптичних розгалужувачах другого каскаду. В другому каскаді доцільно застосовувати планарні ОР з симетричними виходами (однаковими коефіцієнтами розгалуження потужності), тому загасання в цих ОР дорівнює 10,3 дБ. Загасання лінії від ONU до вхідного полюса ОР-2 для абонентів першої (другої) та третьої зони становить відповідно:

$$A_{1-OP2-1} = 1,05 + 10,3 = 11,35 \text{ (дБ)},$$

$$A_{17-OP2-3} = 1,4 + 10,3 = 11,7 \text{ (дБ)}.$$

**Крок 3.** Визначення загасання лінії від ONU до вихідних полюсів ОР першого каскаду проводиться за формулою, що в першому кроці, до якої додається загасання ділянки ONU – вхідний полюс ОР другого каскаду:

$$A_{1...8} = 6 \times 0,35 + 4 \times 0,2 + 4 \times 0,1 + 11,35 = 14,65 \text{ (дБ)},$$

$$A_{9...16} = 4 \times 0,35 + 4 \times 0,2 + 3 \times 0,1 + 11,35 = 13,85 \text{ (дБ)},$$

$$A_{17...24} = 12 \times 0,35 + 4 \times 0,2 + 7 \times 0,1 + 11,7 = 17,4 \text{ (дБ)}.$$

**Крок 4.** Визначення загасання в ОР першого каскаду. Різниця загасань між вихідними полюсами ОР-1 становить понад 3,5 дБ, тому для будівництва збалансованої мережі в даному випадку потрібно застосовувати ОР типу FBT з несиметричним розподілом потужності. Щоб визначити загасання в кожному напрямку передавання ОР-1, потрібно значення загасань кожної ділянки ONU-1,9,17 – вихідний полюс ОР-1 перевести у коефіцієнт загасання за формулою:

$$a_x = 10^{0,1 \times A_x},$$

де  $A_x$  – загасання ділянки  $x$  від ONU до відповідного вихідного полюса ОР.

Отже:

$$a_{1-8} = 10^{0,1 \times 14,65} = 29,2 \text{ (дБ)};$$

$$a_{9-16} = 10^{0,1 \times 13,85} = 24,3 \text{ (дБ)};$$

$$a_{17-24} = 10^{0,1 \times 17,4} = 55 \text{ (дБ)}.$$

Далі необхідно визначити суму коефіцієнтів загасання та коефіцієнт відгалуження потужності сигналу за вихідними полюсами ОР, відповідно за формулами:

$$a_{\Sigma} = \sum_{x=1}^N a_x,$$

$$k_x = \frac{a_x}{a_{\Sigma}},$$

де  $x$  – номер вихідного полюса ОР;

$N$  – кількість вихідних полюсів ОР.

Відсоток відгалуження потужності сигналу за вихідними полюсами ОР:

$$k_{x\%} = k_x \times 100\% = \frac{a_x}{a_\Sigma} 100\%.$$

В результаті розрахунків отримаємо такі значення:

$$a_\Sigma = 29,2 + 24,3 + 55 = 108,5 \text{ (дБ);}$$

$$k_1 = \frac{29,2}{108,5} = 0,269; \quad k_{1\%} = 26,9;$$

$$k_2 = \frac{24,3}{108,5} = 0,224; \quad k_{2\%} = 22,4;$$

$$k_3 = \frac{55}{108,5} = 0,507; \quad k_{3\%} = 50,7.$$

Зазвичай ОР виготовляються з коефіцієнтами розгалуження кратними 5 %, крім того, потрібно враховувати нерівномірність втрат на виходах та власні втрати реального ОР (в розрахунках можна вважати, що ці втрати становлять 20 % або 0,8 дБ від загальних втрат на розгалуження). Отже:

$$a_{\Sigma P} = 1,2 \times 108,5 = 130,2;$$

$$k_{1P} = 0,25; \quad k_{1\%P} = 25\%;$$

$$k_{2P} = 0,25; \quad k_{2\%P} = 25\%;$$

$$k_{3P} = 0,5; \quad k_{3\%P} = 50\%.$$

Далі визначимо загасання в ОР-1 між вхідним (0) та вихідними полюсами (1, 2, 3) з урахуванням коефіцієнтів розгалуження та власних втрат ОР за формулою:

$$A_{OP-0-x} = 10 \lg \frac{a_{\Sigma P}}{k_{xp} \cdot a_\Sigma} = A_{ILx} + A_{EL},$$

де  $A_{ILx}$  – втрати, які вносить ідеальний ОР при передаванні сигналу з вхідного полюса до вихідного полюса  $x$ ;

$A_{EL}$  – надлишкові втрати реального розгалужувача.

$$A_{OP1-0-1} = 10 \lg \frac{130,2}{0,25 \times 108,5} = 6,8 \text{ (дБ)};$$

$$A_{OP1-0-2} = 10 \lg \frac{130,2}{0,25 \times 108,5} = 6,8 \text{ (дБ)};$$

$$A_{OP1-0-3} = 10 \lg \frac{130,2}{0,5 \times 108,5} = 3,8 \text{ (дБ)}.$$

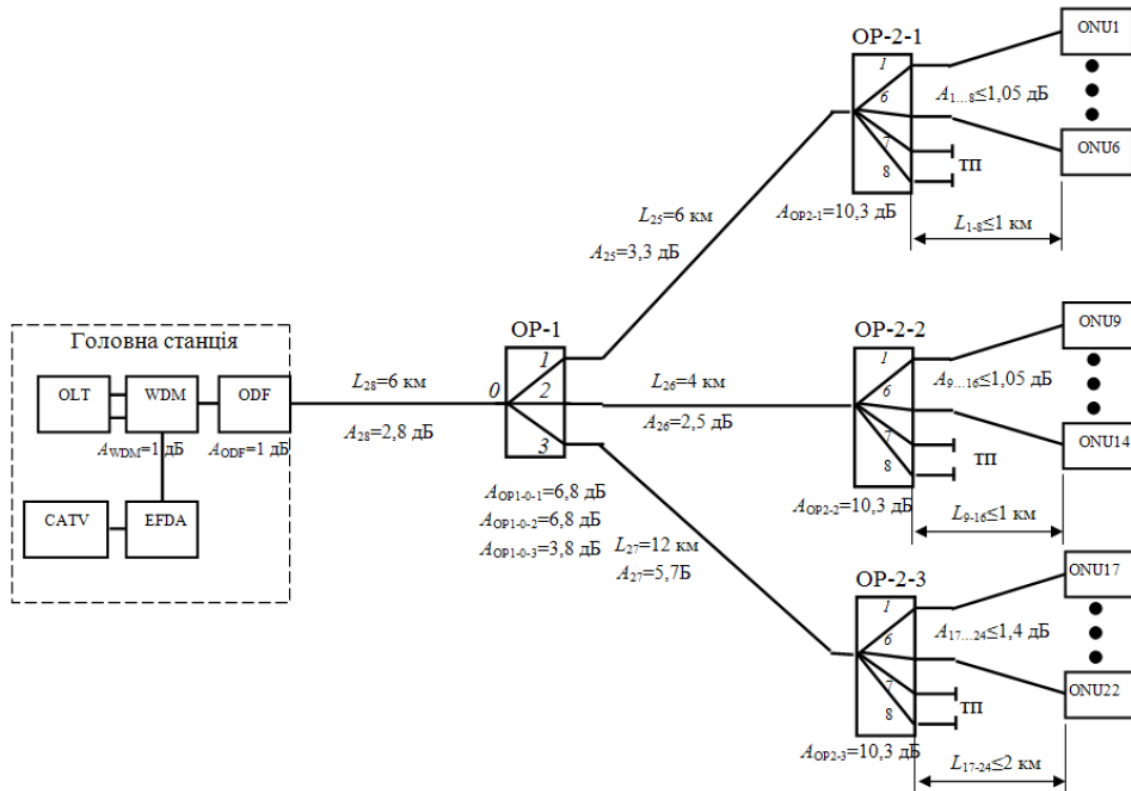


Рисунок 1.32 – Структура сегмента мережі PON для розрахунку бюджету втрат

**Крок 5.** Визначення втрат в кожній гілці «дерева» на ділянці ONU – вхідний полюс OP першого каскаду. Для цього потрібно до загасання ділянки ONU – вихідний полюс OP-1 додати загасання самого OP-1 у відповідному напрямку:

$$A_{1-OP1} = 14,65 + 6,8 = 21,45 \text{ (дБ)};$$

$$A_{9-OP1} = 13,85 + 6,8 = 20,65 \text{ (дБ)};$$

$$A_{17-OP1} = 17,4 + 3,8 = 21,2 \text{ (дБ)}.$$

Як бачимо, найбільше загасання має сигнал у першій гілці «дерева», тому далі розрахунок виконується саме для неї.

**Крок 6.** Визначення втрат на ділянці ONU – вхід головної станції, до якої додається загасання попередніх ділянок мережі:

$$A_{1...28} = 6 \times 0,35 + 2 \times 0,2 + 3 \times 0,1 + 21,45 = 24,25 \text{ (дБ)}.$$

**Крок 7.** Визначення загальних втрат в мережі PON з урахуванням втрат станційної ділянки мережі. До загасання на зовнішній оптичній мережі додається загасання на станційному оптичному кросі ODF (1 дБ, враховуючи всі з'єднання на кросі) та в WDM-мультиплексорі (1 дБ, враховуючи загасання у роз'ємних з'єднувачах):

$$A_{\text{ONU-OLT}} = 24,25 + 1 + 1 = 26,25 \text{ (дБ)}.$$

**Крок 8.** Визначення експлуатаційного запасу шляхом розрахунку різниці між максимальним та розрахованим оптичним бюджетом втрат:

$$A_{\text{зап}} = 28 - 26,25 = 1,75 \text{ (дБ)}.$$

Виконані розрахунки вказують на роботоздатність даного сегмента мережі PON.

## 1.9 Особливості проектування гібридної ОМД

Сучасним варіантом широкопasmового абонентського доступу є «гібридна волоконно-коаксіальна мережа» (HCF). Ця мережа дає можливість поступового переходу від традиційних (повністю коаксіальних) мереж до перспективних мереж доступу, максимально використовуючи існуючу коаксіально-кабельну інфраструктуру й телекомунікаційне обладнання. Найбільш загальною топологією цієї мережі є «дерево» з пасивними ОР. На практиці часто застосовуються її граничні варіанти – «зірка» та «шина». У кожній з цих топологій є свої переваги та недоліки з погляду економії ОК, зручності обслуговування й можливості розвитку мережі (табл. 1.4).

Якість приймання сигналів в мережі залежить від оптичної потужності, що надходить на приймальний пристрій. У випадку передавання аналогових ТВ-сигналів основними параметрами якості, які застосовуються при проектуванні, є співвідношення носійна/шум (ВНШ) та сумарні нелінійні спотворення (комбінаційні спотворення другого і третього порядків).

Проектування оптичної ділянки гібридної мережі доступу для прямого (низхідного) потоку необхідно починати з її кінця – з оптичних вузлів. Задавшись необхідними рівнями потужності на вході приймальних

пристроїв низхідного потоку, і з огляду на втрати в ОВ та розгалужувачах, поступово просуваються (у розрахунках) до початку мережі – головної станції і визначають необхідну потужність передавального пристрою (ПП) низхідного потоку, за якої на виходах усіх приймальних пристроїв (ПрП) забезпечується задана (технічними вимогами) якість передавання. Після цього розраховують коефіцієнти розгалуження ОР. При передаванні даних (висхідний потік) критерієм якості є коефіцієнт помилок (BER). Відомо, що для забезпечення заданої якості цифрового передавання, потрібна значно менша потужність оптичного сигналу на вході ПрП. Це пов'язано з відмінністю у критеріях якості – для аналогового передавання потрібно ВШШ > 43 дБ, а для цифрового – співвідношення сигнал/шум (ВСШ)  $\approx 12$  дБ для забезпечення BER =  $10^{-10}$ . Саме тому на вході ПрП аналогових сигналів потрібний суттєво більший рівень оптичної потужності (-10 – 0 дБм), ніж на вході ПрП цифрових сигналів (-20–35 дБм) для забезпечення відповідної якості передавання.

Таблиця 1.4 – Порівняння пасивних оптичних мереж різної топології

Топологія мережі	«Зірка»	«Шина»	«Дерево»
Кількість ОВ (ОК)	Велика	Мала	Середня
Тестування й обслуговування	Діагностика з головної станції (ГС), проста й точна локалізація подій	Складність діагностування подій	
Географія розташування абонентів	Великий розкид/довільне розташування	Уздовж транспортної магістралі	Довільне розташування
Можливість подальшого розвитку мережі	Максимальне використання вільних портів	Обмежена до 5–7 (максимум станцій)	Потрібен точний розрахунок параметрів розгалужувачів
Рівень потужності сигналу на прийомі	Майже однаковий	Різний при однотипних розгалужувачах	Потрібен точний розрахунок розгалужувачів для вирівнювання рівнів
Інші переваги та недоліки	Масове підімкнення в районах зі щільним розміщенням абонентів	Більші втрати потужності на розгалуження за значної кількості вузлів	Найбільша гнучкість при підключенні всіх бажаних

Необхідними умовами при проектуванні ОМД є:

- використання одномодових оптичних компонентів (лазерні діоди, ОВ (G.652), з'єднувачі та розгалужувачі);
- довжина робочої хвилі має бути 1310 нм або 1550 нм;
- визначення загасання оптичного сигналу в кожному сегменті ОВ на робочій довжині хвилі.

Для вирішення задачі інтелектуального керування ОМД використовуються повністю оптичні, багатопрокольні хвилеві комутатори (MPλS), хвилеві маршрутизатори та конвертори, повністю оптичні МЕМ та інші елементи, які дозволяють виконувати інтелектуальне керування ОМД на оптичному рівні.

Отже, переваги від впровадження технологій спектрального ущільнення полягають в такому: збільшення пропускної здатності ОТСМ, підвищення гнучкості та оперативності керування ТМ, динамічність змін конфігурації ділянок мережі, оптимізована маршрутизація інформаційних потоків, яка забезпечує економію часу та засобів при наданні послуг абонентам.

### **Контрольні завдання**

1. Поясніть призначення оптичних транспортних мереж.
2. Вкажіть переваги та недоліки ОТС.
3. Виконайте загальний опис моделей ОТМ.
4. Поясніть функціональну структуру ОТМ.
5. Вкажіть основні типи структур транспортних мереж ОТМ та поясніть їх призначення і принципи побудови (графічно).
6. Поясніть графічно конфігурації основних вузлів оптичної транспортної мережі.
7. Поясніть призначення та принципи побудови (графічно) основних вузлів оптичної транспортної мережі.
8. Поясніть призначення та принципи побудови вузлів на базі одномодульних ROADMs.
9. Поясніть призначення та будову панелі крос-комутації.
10. Вкажіть типи схем захисту секцій мультиплексування та поясніть їх будову.
11. Вкажіть типи захисних переключень в мережі WDM та поясніть принципи їх побудови.
12. Поясніть будову та умови використання підсистеми захисту оптичних каналів за принципом 1+1.
13. Поясніть особливості будови оптичної транспортної ієрархії.
14. Поясніть особливості визначення рівня ієрархії ОТС.
15. Поясніть особливості технологій оптичних мереж доступу.
16. Поясніть принципи побудови ОМД.
17. Поясніть методику проектування ОМД.



## 2 ТЕХНОЛОГІЇ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ В ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

### 2.1 Класифікація технологій оптичного мультиплексування

Сучасні ОТМ будуються на основі технологій мультиплексування та передавання, які визначені в стандартах, моделях ОТМ СЦІ, АТМ, ОТМ-ОТІ та Ethernet. Тому робота обладнання ВОЛТ цих ОТМ базується на використанні таких технологій:

- оптичного мультиплексування з розподілом по довжині хвилі (WDM);
- оптичного мультиплексування з часовим розподілом каналів (OTDM);
- оптичного мультиплексування з кодовим розподілом каналів (OCDM).

Оптичний мультиплексор забезпечує об'єднання вхідних сигналів з різними носійними частотами в один багаточастотний оптичний сигнал для подальшого передавання в ВОЛТ. Мультиплексування виконується пасивними пристроями, які функціонують на основі явищ фізичної оптики: дисперсії, дифракції та інтерференції. Демультиплексування групового сигналу здійснює демультиплексор шляхом виділення з групового багаточастотного сигналу каналних потоків для подальшого передавання їх через окремі ОВ до оптичних приймачів.

Потрібно відмітити, що найпоширеніший тип ОВ забезпечує роботу ОТС в трьох ВП в інфрачервоній області з центральними довжинами хвиль 850 нм, 1300 нм та 1550 нм. Для довгих ВОЛТ використовують довжини хвиль 1300 нм та 1550 нм з мінімальним затуханням оптичних сигналів.

Оптичне мультиплексування низької щільності базується на використанні одного ОВ для передавання та прийому сигналів з різними носійними довжинами хвиль, які об'єднуються та розділяються шляхом оптичного частотного мультиплексування (ОЧМ).

На рисунку 2.1 показано принцип реалізації методу ОЧМ (WDM).

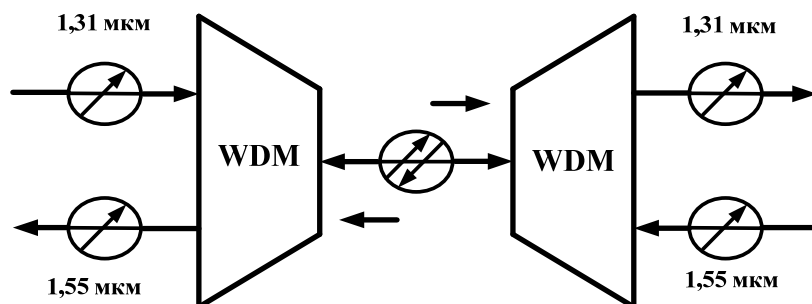


Рисунок 2.1 – Схема оптичного мультиплексування WDM

На рисунку 2.2 показано робочий спектр WDM-системи.

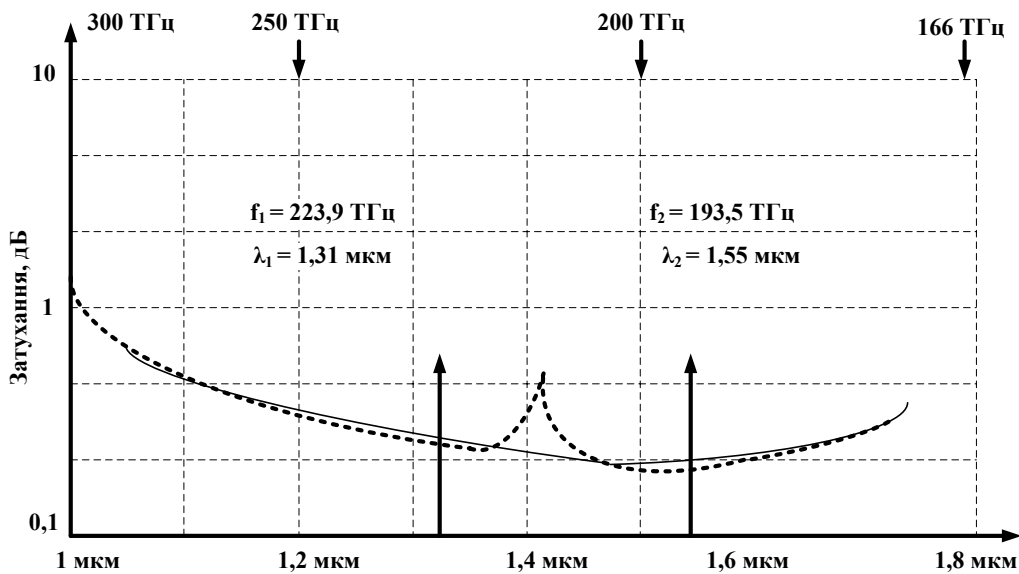


Рисунок 2.2 – Робочий спектр WDM-системи

Системи оптичного мультиплексування високої щільності (DWDM) забезпечують передавання 4, 8, 16, 32, 80 та більше каналів зі швидкістю від 2,5 до 10 Гбіт/с. Ці системи працюють в третьому ВП (1528–1560 нм), що припадає на діапазон «С» та використовують значення міжканальних інтервалів в діапазоні від 100 до 1000 ГГц (0,8–8 нм). Особливості розвитку систем оптичного мультиплексування показано на рисунку 2.3.

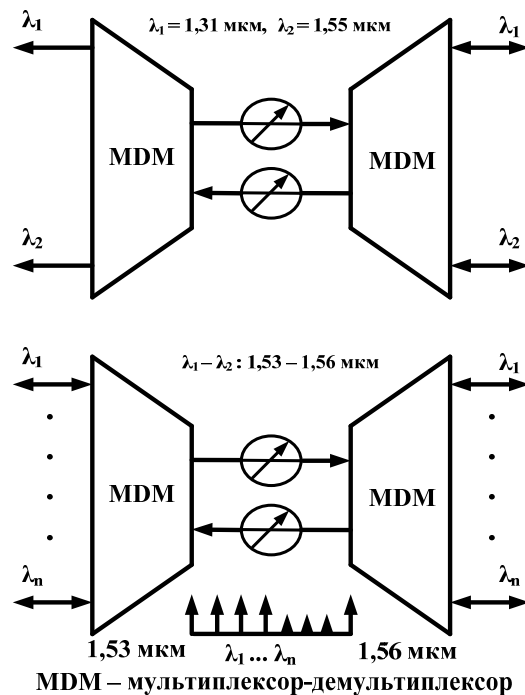


Рисунок 2.3 – Розвиток технології ОЧМ від WDM до DWDM

Системи оптичного мультиплексування (ОМ) високої та низької щільності можуть спільно використовуватись (рис. 2.4).

На даний час широко використовуються 6 робочих оптичних діапазонів, які наведено в таблиці 2.1.

Потрібно відмітити, що ОТС з СРК можуть поєднувати методи часового та частотного ущільнення каналів. Тому такі ОТС забезпечують можливість транспортування інформаційних сигналів систем передавання СЦІ (ПЦІ) або АТМ, Ethernet чи ІР (рис. 2.4). ВОЛТ цих ОТС за допомогою стандартизованих електричних та оптичних інтерфейсів фізичного рівня (G.691, G.692, G.703, G.957, G.959.1, I.432) можуть передавати високошвидкісні цифрові потоки в межах робочих діапазонів.

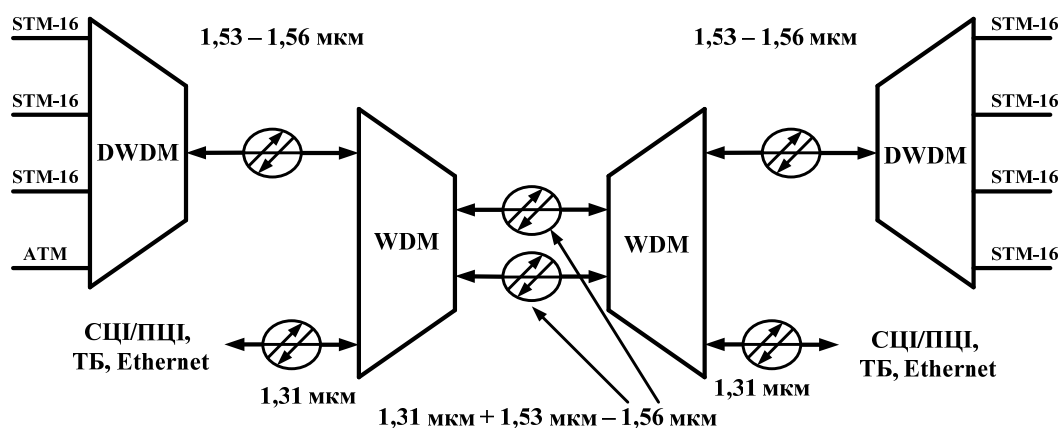


Рисунок 2.4 – Правила спільного використання оптичного мультиплексування низької (WDM) та високої (DWDM) щільності

Таблиця 2.1 – Перелік робочих оптичних діапазонів

Позначення діапазону	Назва діапазону	Величина діапазону, мкм
О	Первинний (Original)	1,260–1,360
Е	Розширений (Extended)	1,360–1,460
С	Короткохвильовий (Short wavelength)	1,460–1,530
С	Стандартний (Conventional)	1,530–1,565
Л	Довгохвильовий (Long wavelength)	1,565–1,625
U	Наддовгохвильовий (Ultra long wavelength)	1,625–1,675

Згідно з рекомендацією МСЭ-Т пристрої ОМ поділяються на типи:

- WDM – ОМ низької щільності з значенням міжканального інтервалу від декількох десятків до сотень нм;

- CWDM – «грубе» ОМ з міжканальним інтервалом 20 нм, що відповідає рознесенню частот між каналами біля 2500 ГГц;

- DWDM – OM високої щільності з міжканальним інтервалом 0,8 нм, що відповідає рознесенню частот між каналами не менше 100 ГГц;

- HDWDM – OM дуже високої щільності з міжканальним інтервалом 0,4 нм, що відповідає рознесенню частот між каналами менше 50 ГГц.

Перші дві технології орієнтовані на широке використання на місцевих мережах або ділянках абонентського доступу. Також ОТС можуть класифікуватися за значенням міжканального рознесення частот:

- для WDM – міжканальний інтервал становить не менше 200 ГГц (1,6 нм) з організацією до 8 каналів;

- для DWDM – міжканальний інтервал становить не менше 100 ГГц (дозволяється організувати 32–40 каналів);

- для HDWDM – міжканальний інтервал становить не більше 50 ГГц (дозволяється організувати не менше 40 каналів).

В специфікації Gigabit Ethernet для позначення багатохвильового інтерфейсу використовується скорочення WWDM.

В цілому пропускна здатність ВОЛТ на базі одномодового ОВ оцінюється в 50–60 Тбіт/с. Тому ОТМ на базі ОТС з спектральним ущільненням дозволяють значно підвищити коефіцієнт використання пропускної здатності ОВ.

На рисунку 2.5 показано функціональну схему DWDM-технології, яка пояснює її принцип дії та переваги. Ця технологія дозволяє отримати найбільш масштабний та рентабельний метод розширення в сотні раз смуги пропускання волоконно-оптичних каналів.

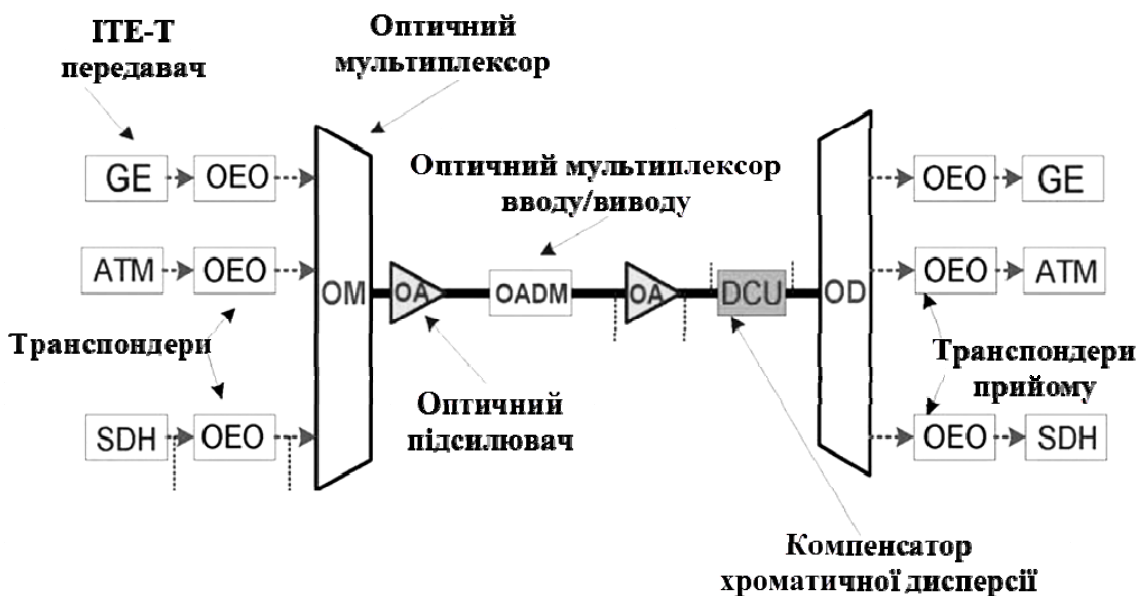


Рисунок 2.5 – Узагальнена архітектура DWDM ОТС

Пропускна здатність оптичних трактів на базі DWDM ОТС можна нарощувати поступово шляхом додавання в існуюче обладнання нових оптичних каналів.

Частотний план для магістральних DWDM ОТС визначається стандартом ITU G.694.1, в якому визначено умови використання ОТС та вимоги до їх компонентів (ширини спектра джерела випромінювання та його температурної стабілізації). Стрімкий розвиток ОТС на базі DWDM обумовлений появою ефективних волоконних ербієвих підсилювачів (EDFA), які працюють в 3-му ВП (в діапазоні 1525–1565 нм).

## 2.2 Особливості використання DWDM-технології

Для забезпечення спільної роботи DWDM-обладнання різних виробників виконано стандартизацію номінального ряду робочих оптичних носійних, тобто створено каналний та частотний плани, що викладені в рекомендації G.692.

Вимоги до значень міжканальних інтервалів визначаються такими факторами:

- лінійними переходами між каналами, які виникають в мультиплексорах, демультиплексорах та між оптичними фільтрами в блоці ОА/ОД;
- нелінійними переходами між каналами, які виникають в ОВ.

Потрібно відмітити, що найбільш шкідливими є переходи від чотирихвильового змішування (FWM). Оскільки, для різних типів ОВ потужність цих завад є різною, частотні плани корегуються окремо під кожен тип ОВ.

В рекомендації G.692 наведено частотні плани, що припадають на третє ВП та ОВ, згідно з рекомендаціями G.652, G.655, G.653.

Для зменшення впливу чотирихвильового змішування в WDM-ОТС при використанні ОВ (G.653) рекомендовано застосовувати неоднакові значення міжканальних інтервалів.

Потрібно відмітити, що максимальна швидкість передавання в WDM-ОТС залежить від робочого частотного плану згідно з формулою:

$$V_{\max} = V_{\text{ch}} \cdot n,$$

де  $V_{\text{ch}}$  – максимальне значення швидкості інформаційного потоку в оптичному каналі;

$n$  – кількість оптичних каналів.

При передаванні інформаційних потоків рівня STM-64 за допомогою DWDM ОТС з міжканальними інтервалами 100 ГГц, спектральна ширина лінії випромінювання їх передавачів не повинна перевищувати  $\pm 0,08$  нм та нестабільність частоти оптичної носійної не повинна перевищувати 10 ГГц.

Згідно з рекомендацією G.957 для ОТС СЦІ допустимі значення спектральних параметрів їх вихідних оптичних інтерфейсів становлять:

- ширина спектральної лінії  $\Delta = 0,5$  нм (для STM-16), для STM-64 –  $\Delta = 0,1$  нм;

- значення центральної оптичної довжини хвилі має бути в межах діапазону 1530 – 1565 нм.

Для компенсації енергетичних втрат в ОМ ВОЛТ використовуються ОП потужності (BOOSTER) та попередні ОП. При завищених значеннях оптичної потужності групового сигналу в ОВ виникають додаткові шуми та перехресні завади:

- самомодуляція фази оптичної носійної (SPM);
- перехресна модуляція фази (CPM);
- чотирихвилеве змішування (FWM);
- ефект примусового розсіювання Брілюєна (SBS).

Тому, значення сумарної оптичної потужності в xWDM-системах регламентовано рекомендацією (G.692) та обмежується рівнем +23 дБм. Це значення оптичної потужності зумовлене двома факторами: допустимим впливом нелінійних спотворень та вимогами до безпеки обслуговуючого персоналу.

Використання оптичних мультиплексорів (OADM) в DWDM-мережах забезпечує безпосередній ввід/вивід каналів на оптичному рівні (без перетворень оптичного сигналу в електричний) в DWDM-магістраль та побудову розгалужених ОТМ. Спільне використання обладнання SDH, PDH та DWDM забезпечує гнучкий перехід до повністю IP-сумісних мереж, що відповідає вимогам підвищення функціональності та пропускної здатності ОТМ.

Солітонові DWDM-системи дозволяють суттєво збільшити пропускну здатність оптичних каналів та довжину ВОЛТ через відсутність в них дисперсії за рахунок ефекту перерозподілу енергії між спектральними складовими. Ця технологія є найбільш перспективною для STM-256 (40 Гбіт/с) на довгих ВОЛТ.

Використання STM-інтерфейсів з фіксованою довжиною хвилі та вузьким спектром випромінювання в обладнанні СЦІ дозволяє відмовитись від використання транспондерів. Ці «кольорові» інтерфейси дозволяють скоротити кількість перетворень Е-О-Е та зменшити кількість з'єднувальних оптичних кабелів і трансиверів, що підвищують надійність роботи обладнання.

Використання DWDM-технології виправдано при передаванні великих об'ємів трафіка.

Перспективою подальшого розвитку DWDM-технологій є удосконалення роботи мультисервісних мереж за рахунок підвищення їх пропускної здатності шляхом збільшення кількості робочих довжин хвиль.

### **2.3 Особливості використання CWDM-технології**

Враховуючи обмежену смугу активного підсилення ОП (EDFA) та в результаті обмежену смугу робочих частот в 30 нм (1530–1560 нм), xWDM ОТС забезпечується розширенням ширини смуги каналу зв'язку цих систем шляхом зменшення міжканальних інтервалів (для високощільних HDWDM-систем міжканальний крок дорівнює 0,2–0,1 нм).

Використання CWDM-технології стало можливим після ліквідації «водяного» піка поглинання на кривій згущання ОВ на довжині хвилі 1383 нм. Згідно з рекомендацією G.694.2 можливо використовувати до 18 носійних частот з міжканальним інтервалом 20 нм. При використанні стандартного одномодового ОВ (SSF) кількість носійних обмежується до 8, які розміщені в діапазоні шириною в 140 нм (1470–1610 нм).

На рисунку 2.6 наведено розподіл робочих довжин хвиль за діапазонами для CWDM-технології, згідно з рекомендацією G.694.2.

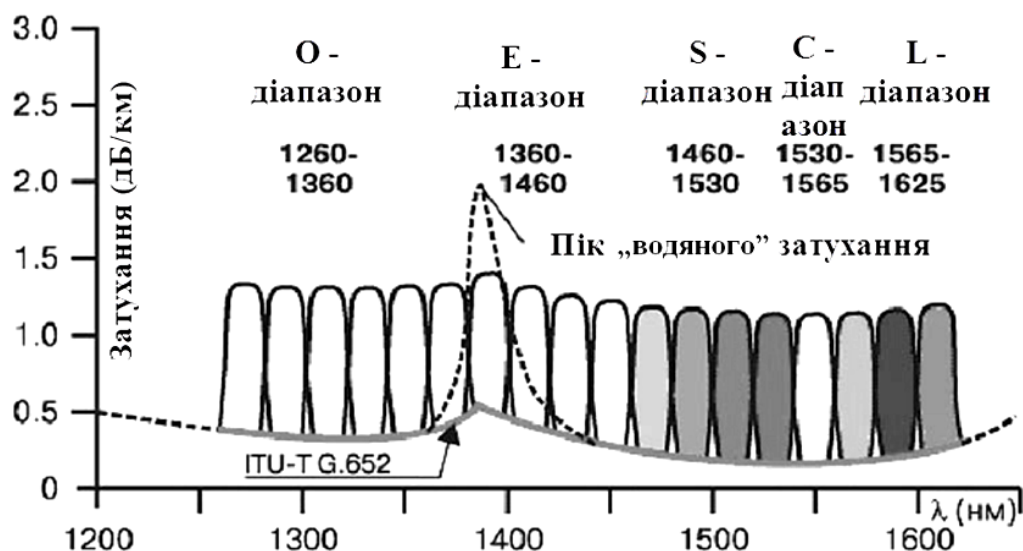


Рисунок 2.6 – Розподіл робочих довжин хвиль по діапазонах для CWDM-технології

CWDM-технологія забезпечує спектральне ущільнення декількох Gigabit Ethernet-каналів, що дає можливість економити ресурс ОВ та отримати нові технологічні рішення для використання оптичних мультиплексорів (одне ОВ – до 9 GE потоків).

Проблеми при реалізації xWDM-систем пов'язані головним чином з подоланням 3-х факторів:

- впливу ефекту чотирихвильового зміщення;
- впливу завад від сусідніх каналів;
- обмеження сумарної потужності сигналу в ОВ.

Вплив ефекту чотирихвильового зміщення компенсується використанням ОВ з нульовою зміщеною дисперсією (NZDSF), нерівномірним розподілом носійних частот та шляхом використання схем інтерлівінга. Найбільш придатним для щільного та високощільного WDM-ущільнення (DWDM та HDWDM) є ОВ (G.655), а для розрідженого WDM-ущільнення (CWDM) – ОВ (G.656).

Вплив міжканальних завад може бути знижено такими способами:

- збільшення значення міжканального інтервалу;

- використанням зовнішнього модулятора (зменшення ширини смуги носійної частоти);
- використанням солітонної технології або методу модуляції з подавленням однієї бічної смуги (ОБС);
- використанням функції інтерлівінга.

Діапазон обмеження значення сумарної потужності сигналу в ОВ залежить від безпечного рівня випромінювання лазера та допустимого рівня сумарних нелінійних спотворень в серцевині ОВ і дорівнює значенням від 17 до 30 дБм.

$$P_{c,max} = P_{ном} - 10 \lg n,$$

де  $n$  – кількість мультиплексованих довжин хвиль.

Використання CWDM-технології в ОТС є простим та економічно вигідним вирішенням проблеми дефіциту ОВ.

Використання CWDM-ОТС є доцільним в таких випадках:

- міські та регіональні ОТМ;
- будівництво ТМ в умовах дефіциту ОВ;
- необхідність збільшення пропускної здатності існуючих ТМ;
- CWDM-технології, що не залежать від типу протоколу передавання інформації.

CWDM-технологія є пасивною, тобто в лінійному тракті не використовуються активні елементи з максимальною дальністю зв'язку, що не перевищує 80–100 км та максимальною кількістю каналів що не перевищує 18. CWDM-технології забезпечують надання різних телекомунікаційних послуг в межах однієї ОТМ.

## 2.4 Функції xWDM-обладнання в ОТМ

Базовими елементами ОТС з багатохвильовим ущільненням – WDM, DWDM та CWDM є пристрої, що об'єднують просторово розділені оптичні інформаційні потоки в груповий потік та називаються оптичними мультиплексорами. Ці xWDM-мультиплексори також можуть використовуватися в ОП та локальних мережах з хвильовою маршрутизацією.

В HDWDM ОТС використовуються ОМ, що побудовані з використанням дифракційних фазових решіток на базі ешелону Майкельсона. Класичний ешелон Майкельсона складається з складених паралельних пластин різної довжини.

Технологія DWDM забезпечує збільшення пропускної здатності ОТС СР за рахунок одночасного передавання декількох каналів на різних довжинах хвиль по одному ОВ, а також забезпечують ввід/вивід та кроскомутацію оптичних каналів.

Узагальнену структурну схему ділянки ОТМ на основі DWDM-технології показано на рисунку 2.7.



Оптичний мультиплексор об'єднує сигнали різних довжин хвиль від «кольорових» оптичних передавачів за допомогою SDH, GE, 10 GE інтерфейсів та транспондерів в багатоканальний груповий оптичний лінійний сигнал.

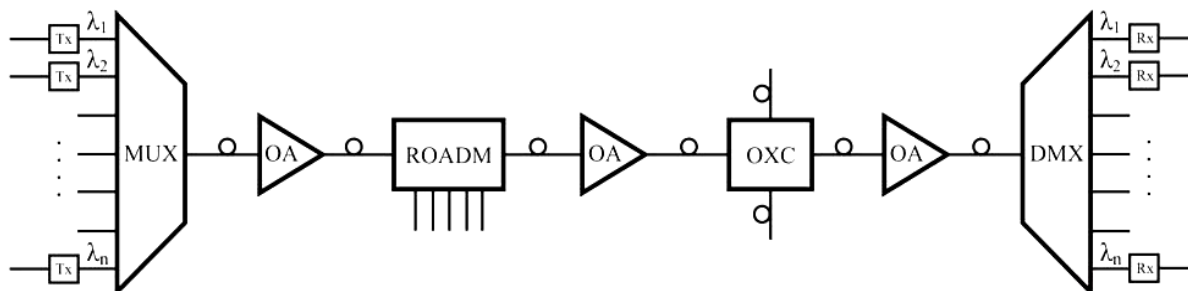


Рисунок 2.7 – Узагальнена структурна схема ділянки ОТС з DWDM

Оптичний демультиплексор розділяє лінійний груповий оптичний сигнал на каналні оптичні сигнали по довжині хвилі.

Динамічні оптичні мультиплексори вводу/виводу (ROADM) забезпечують програмне введення та виділення будь-якої комбінації оптичних каналів у вузлах ОТС.

Оптичні крос-комутатори (ОКС) виконують крос-комутацію оптичних каналів по обхідних маршрутах у випадку перевантаження діючих комутаційних транспортних вузлів ОТС.

Комутатори хроматичної дисперсії (СХД) виконують коригування форми імпульсів цифрового лінійного сигналу в ВОЛТ DWDM ОТС.

Оптичні підсилювачі (ОП): потужності, попередні та лінійні, компенсують втрати потужності оптичного сигналу в ВОЛ та пасивних компонентах довгих ВОЛТ DWDM ОТС.

Потрібно відмітити, що оптичні мультиплексори та демультиплексори, оптичні мультиплексори вводу/виводу, оптичні крос-комутатори, оптичні компенсатори хроматичної дисперсії є пасивними компонентами xWDM-систем та працюють на стандартизованих частотах згідно з частотним планом (G.694.1). Базовим частотним планом DWDM-систем є набір частот з інтервалом 100 ГГц ( $\Delta\lambda = 0,8\text{нм}$ ) та центральною частотою 193,1 ТГц.

DWDM-технологія забезпечує передавання значних інформаційних потоків на великі відстані за рахунок використання ОП в магістральних та місцевих транспортних мережах зв'язку. На рисунку 2.8 відображено розподіл каналів CWDM-технології по спектральних діапазонах, які разом займають діапазон від 1260 нм до 1625 нм при міжканальному інтервалі 20 нм.

За відсутності необхідності передавання високошвидкісних інформаційних потоків використовуються CWDM-системи з низькою щільністю спектральних каналів. Згідно з рекомендацією G.694.2 спектральний план CWDM-систем поширюється на 5 діапазонів (O, E, S, C, L). Максимальна кількість спектральних каналів для CWDM-технології дорівнює 18 за умови використання ВОЛ без «водяного» піка.

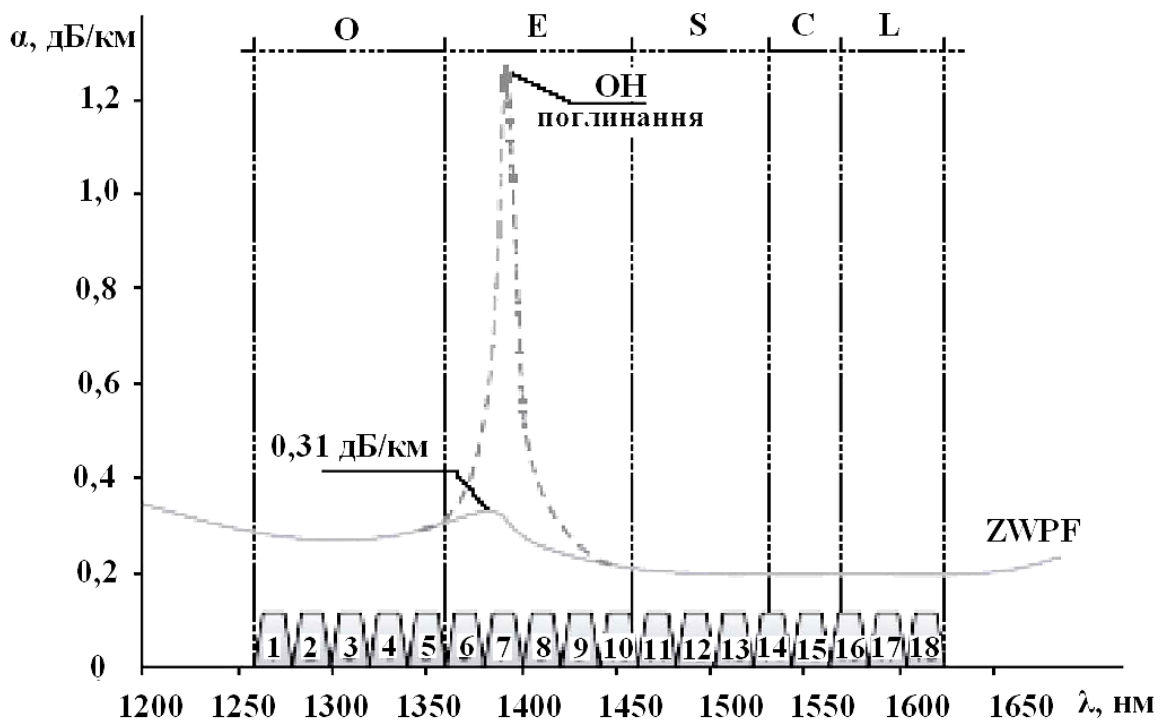


Рисунок 2.8 – Розподіл спектральних каналів в CWDM-технології

DWDM-мультиплексори забезпечують об'єднання/розділення великої кількості хвилевих каналів (понад 32) і тому в DWDM ОТС додатково можуть використовуватись мультиплексори вводу/виводу для пасивної маршрутизації по довжинах хвиль (додавання та виведення одного або більше хвилевих каналів з групового мультиплексного сигналу). Підвищені вимоги до перехідних завод в DWDM-мультиплексорах (коефіцієнти направленості та ізоляції) передбачають високу технологічність при їх виготовленні.

При порівнянні ефективності роботи двох варіантів ОТС однакової пропускної здатності 80 Гбіт/с побудованих на основі 32 каналного оптичного мультиплексора рівня STM-16 та 8-каналного оптичного мультиплексора рівня STM-64, доведено перевагу системи передавання на базі 32-каналного оптичного мультиплексора рівня STM-16 за рахунок переваги в довжині ВОЛТ, що обумовлена кращими енергетичними та дисперсійними параметрами (табл. 2.3 та рис. 2.9).

Таблиця 2.3 – Основні параметри оптичних сигналів обладнання STM-16 та STM-64

Параметри ОТС СЦ	STM-16 (2,5 Гбіт/с)	STM-64 (10 Гбіт/с)
Мінімальне відношення сигнал/шум, дБ	18–21	27–31
Допустима дисперсія в ОВ, пс/нм	10500	1600
Обмеження довжини ВОЛТ через ПМД	не має	< 400 км

DWDM-мультиплексори, на відміну від мультиплексорів СЦІ рівня STM-64, забезпечують прозорий доступ до будь-яких потоків (E1 – STM-16) за допомогою інтерфейсів компонентних потоків. Тому обладнання рівня STM-64 дозволяє ефективно створювати лише OTM лінійної топології, а обладнання рівня STM-16 додатково дозволяє створювати OTM кільцевої архітектури.

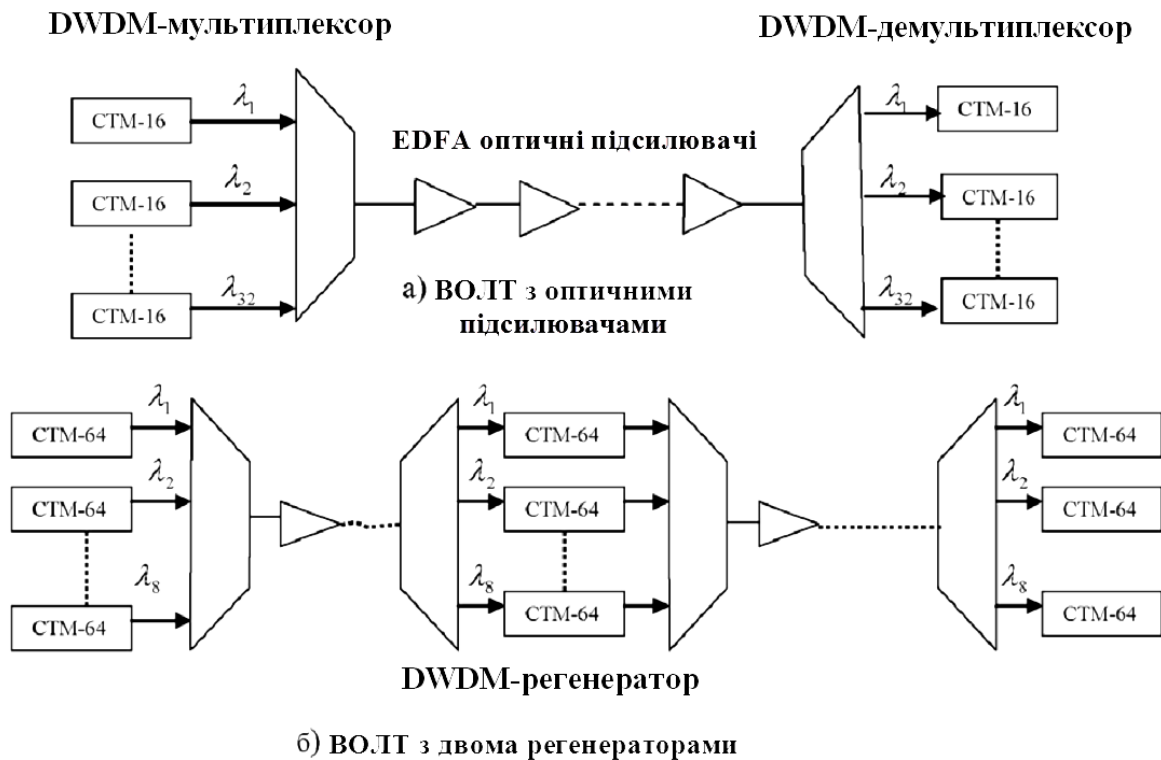


Рисунок 2.9 – Варіанти будови ВОЛТ з пропускною здатністю 80 Гбіт/с на основі:

- а) 32-канального оптичного мультиплексора рівня STM-16 та
- б) 8-канального оптичного мультиплексора рівня STM-64

Перспективним напрямком в створенні повністю оптичних ТМ є їх сегментування та оптична крос-комутація інформаційного сигналу без перетворень. Цей підхід є більш простим та технологічним рішенням порівняно з часовим ущільненням при створенні агрегатних потоків STM-N.

## 2.5 Будова оптичних мультиплексорів та демультимплексорів

Оптичний мультиплексор СЦІ об'єднує вихідні сигнали з «кольорових» оптичних передавачів SDH-обладнання та транспондерів в багатоканальний груповий оптичний сигнал для подальшого передавання у ВОЛТ. Оптичний демультимплексор виконує розподіл групового оптичного сигналу на каналні по довжині хвилі. Враховуючи, що більшість оптичних му-

льтиплексорів та демультимплексорів є універсальними щодо операцій мультиплексування та демультимплексування, достатньо лише розглянути параметри демультимплексорів.

Оптичні демультимплексори поділяються на типи: демультимплексори на основі оптичних фільтрів та на базі дисперсійних елементів.

В DWDM- та CWDM-демультиплексорах як оптичні фільтри можуть використовуватися: фільтри на багатошарових діелектричних тонких плівках (DTF) та фільтри на волоконних брегівських решітках (FBG).

Фільтри на багатошарових діелектричних тонких плівках складаються з декількох шарів прозорого діелектричного матеріалу з різними показниками заломлення та оптичної підкладки. Принцип роботи цих фільтрів базується на створенні різних фазових затримок на відповідних довжинах хвиль за рахунок відбивання від різних шарів діелектричного матеріалу фільтра, що і призводить до інтерференційного складання або поглинання відбитих хвиль.

Для мультиплексування багатохвильових сигналів використовують багатоступеневі системи фільтрів.

Волоконна брегівська решітка складається з відрізка ОВ з просторово-періодичною структурою, яка утворює оптичний інтерферометр в ОВ та становить основу фільтрів на брегівських решітках. На рисунку 2.10 відображено принцип дії волоконної брегівської решітки.

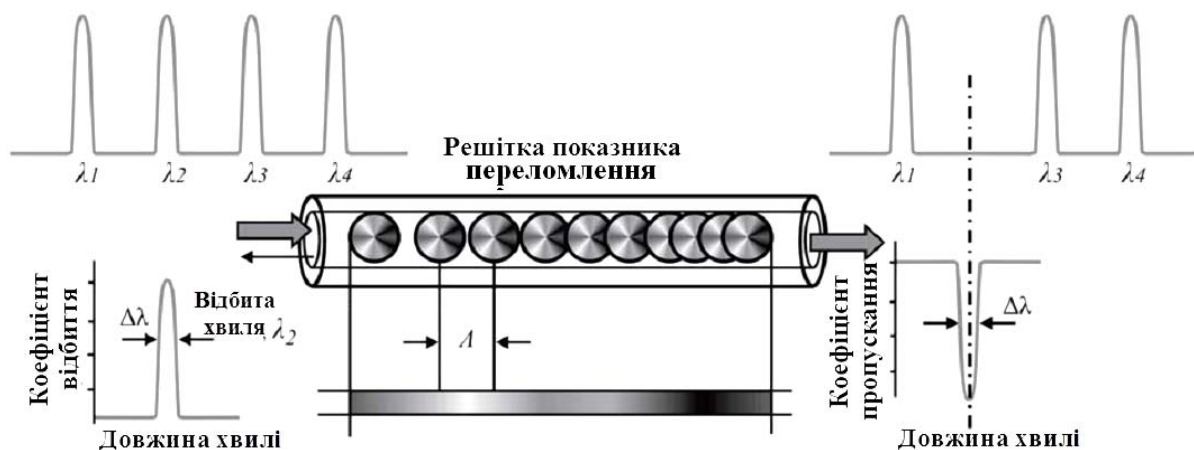


Рисунок 2.10 – Принцип дії волоконної брегівської решітки

Потрібно відмітити, що тонкоплівкові фільтри характеризуються вузькою смугою відбиття та можуть використовуватися в CWDM- та DWDM-системах з організацією до 32 оптичних каналів. Значення центральної довжини хвилі  $\lambda_0$  фільтра на основі волоконної брегівської решітки залежить від її періоду  $\Lambda$  :

$$\lambda_0 = 2n\Lambda,$$

де  $n$  – ефективний показник переломлення ОВ.

Смуга пропускання цього фільтра є оберненопропорційною значенню довжини брегівської решітки. Центральна довжина хвилі та смуга пропускання є температурозалежними.

Для забезпечення мультиплексування декількох десятків оптичних каналів необхідно використовувати оптичні мультиплексори на основі просторових дисперсійних елементів. В DWDM-мультиплексорах такого типу використовуються об'ємні фазові дифракційні решітки відбивного типу та фазові інтегральні дифракційні решітки (решітки на основі масиву планарних хвилеводів AWG).

На рисунку 2.11 показано принцип побудови оптичного демультиплексора на базі відбивної об'ємної дифракційної решітки.

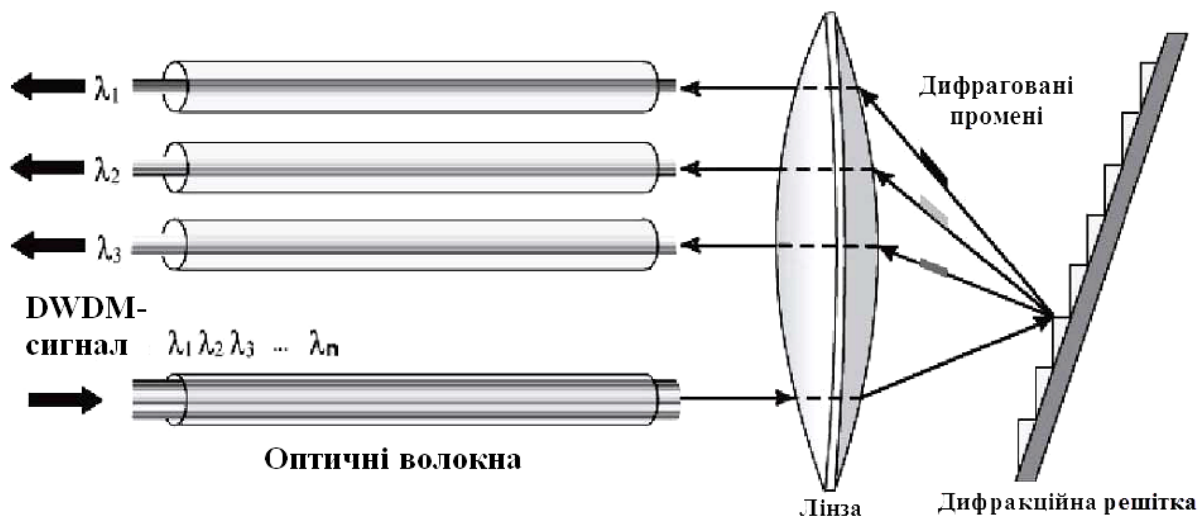


Рисунок 2.11 – Узагальнена схема оптичного демультиплексора на основі відбивної об'ємної дифракційної решітки

Перевагою об'ємних дифракційних решіток є незалежність їх внесених втрат потужності оптичного сигналу від кількості оптичних каналів. Недоліком цих дифракційних решіток є технологічна складність суміщення їх волоконних та об'ємних компонентів.

Використання дифракційних решіток на основі масивів планарних хвилеводів (AWG), які побудовані з використанням інтегральної оптики є компромісним (покращеним) варіантом, що спрощує процес виробництва оптичних демультиплексорів. Принцип побудови демультиплексора на основі планарних хвилеводів показано на рисунку 2.12.

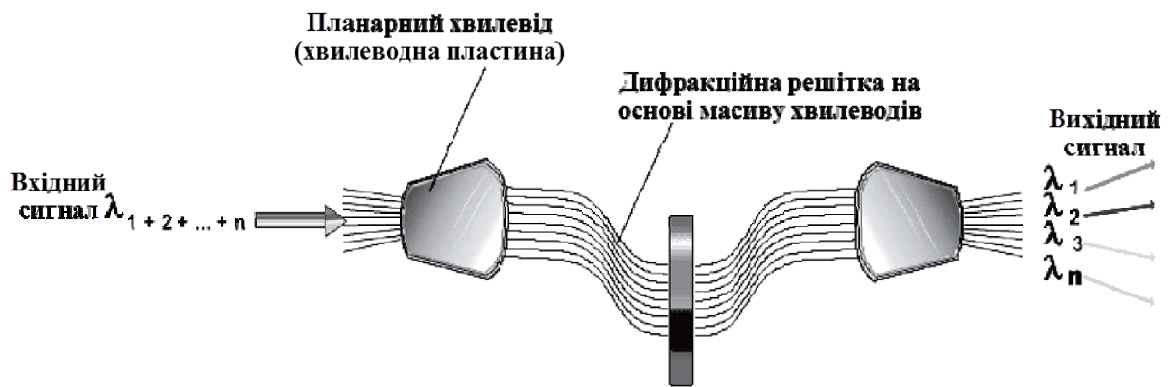


Рисунок 2.12 – Узагальнена схема оптичного демультиплексора на основі планарних хвилеводів (AWG)

Принцип дії планарної фазової решітки базується на розкладанні вхідного групового сигналу в планарному розгалужувачі на  $N$  оптичних сигналів та подальше їх передавання в хвилеводну матрицю, що складається з  $N$  хвилевідних каналів, що вносять в сигнал різні фазові зсуви за рахунок різної власної довжини. У вихідному планарному розгалужувачі оптичні сигнали об'єднуються та інтерферують так, що сигнали з різними довжинами хвиль потрапляють в різні хвилеводи.

На рисунку 2.13 показано принцип побудови демультиплексора з одним розгалужувачем та відбивним елементом.

Будова планарних фазових решіток AWG базується на малогабаритних модулях з високим значенням температурного коефіцієнта ( $0,01 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ ), що потребує додаткового використання стабілізаторів температури.

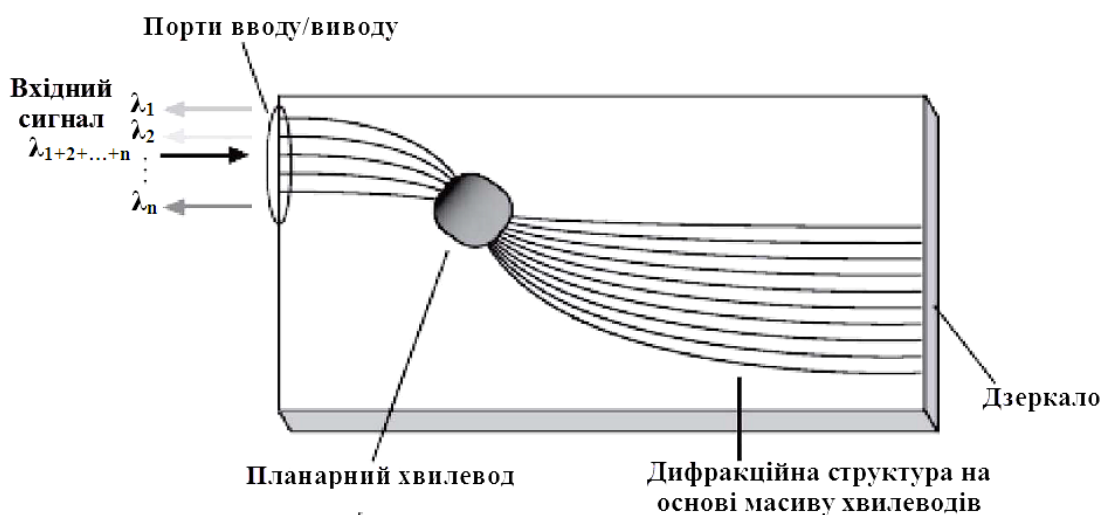


Рисунок 2.13 – Структура оптичного демультиплексора з розгалужувачем

Решітки AWG, «драконові маршрутизатори», фазові матриці або фазари є основою при виробництві DWDM-мультиплексорів/демультиплексорів, що забезпечують можливість ущільнення понад 200 оптичних каналів.

## 2.6 Особливості використання термінальних мультиплексорів

В основі побудови термінальних мультиплексорів об'єднано технології різних типів OTM: SDH, ATM, OTN-OTN, Ethernet.

Термінальний мультиплексор з функціями портів PDH, залежно від можливостей агрегатного порту STM-N, об'єднує на передаванні та розділяє на прийомі цифрові потоки плезіохронної ієрархії: E1, E2, E3 та E4.

Мультиплексор SDH з функціями портів Ethernet забезпечує гнучке узгодження інформаційних потоків Ethernet 100 та Ethernet 1000 з SDH циклами у вигляді віртуальних контейнерів VC-X-Xv.

Для забезпечення режиму асинхронного передавання ATM в складі мультиплексорів SDH мультисервісних пакетних транспортних мереж використовуються інтегровані сервіс-адаптери, які забезпечують створення віртуальних маршрутів та каналів ATM.

Для узгодження роботи TM СЦІ з OTM-OTI в OM СЦІ передбачено програмні цикли зчеплених віртуальних контейнерів VC-4-Xv, тобто забезпечується взаємодія TM OTI з СЦІ лише на рівні STM-64.

В складі обладнання СЦІ можуть використовуватися термінальні мультиплексори з портами xWDM-стандартів, а саме: щільного мультиплексування (DWDM) та розрідженого мультиплексування (CWDM), в яких додатково реалізовано функції оптичного підсилення, компенсації дисперсії, корекції помилок. Принцип побудови термінального мультиплексора з xWDM-портами показано на рисунку 2.14.

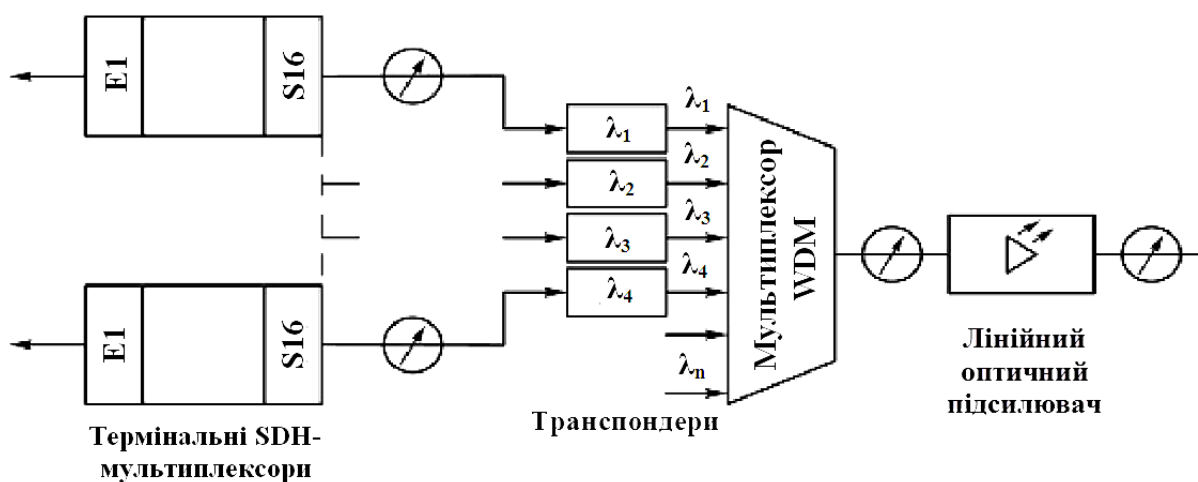


Рисунок 2.14 – Узагальнена схема термінального мультиплексора з WDM-портом

В цій схемі транспондерні пристрої перетворюють сигнали STM-N в оптичні сигнали з фіксованими оптичними носійними хвилями  $\lambda_1 \dots \lambda_n$  та виконують функції ретрансляції електричних сигналів, а саме:

- 1R – виконується тільки підсилення сигналу;
- 2R – виконується регенерування та підсилення сигналу;
- 3R – виконується регенерування, підсилення та відновлення синхронізації сигналу.

Транспондери з розширеними функціями 3R+ переносять інформаційний трафік з обладнання STM-N в цикли OTN з додатковою корекцією помилок, що підвищує довжину та якість роботи ВОЛТ.

При використанні «кольорових» інтерфейсів в складі термінальних SDH-мультиплексорів забезпечується можливість роботи в режимі WDM та спрощується будова цих мультиплексорів, як показано на рисунку 2.15.

Мультиплексори вводу/виводу (ADM) широко використовуються при побудові мережних вузлів, які дозволяють організовувати різні типи архітектур OTM. При цьому ключовими функціями таких мережних вузлів є: кросова комутація інформаційних потоків, використання лінійних (агрегатних) інтерфейсів для захисних функцій секцій та трактів (з'єднань в мережі), інтерфейси користувачів для здійснення функцій керування і синхронізації.

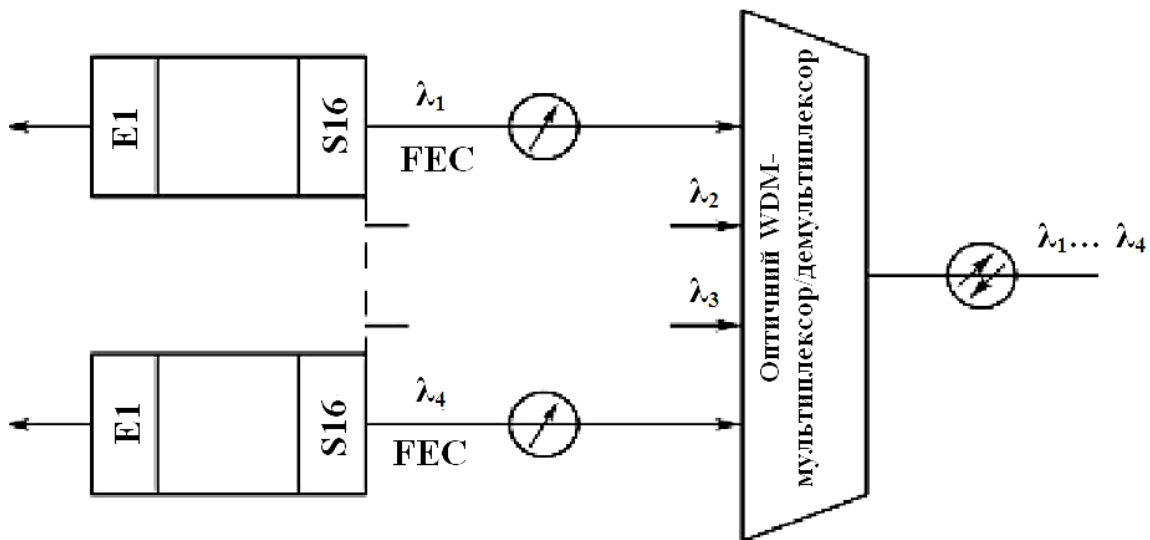


Рисунок 2.15 – Узагальнена схема термінального мультиплексора з WDM-портом та «кольоровими» інтерфейсами

Мультиплексори ADM широко використовуються в OTM з xWDM-технологією для формування доступу до окремих оптичних каналів з термінуванням частини інформаційних потоків (E1, E3) як показано на рисунку 2.16.



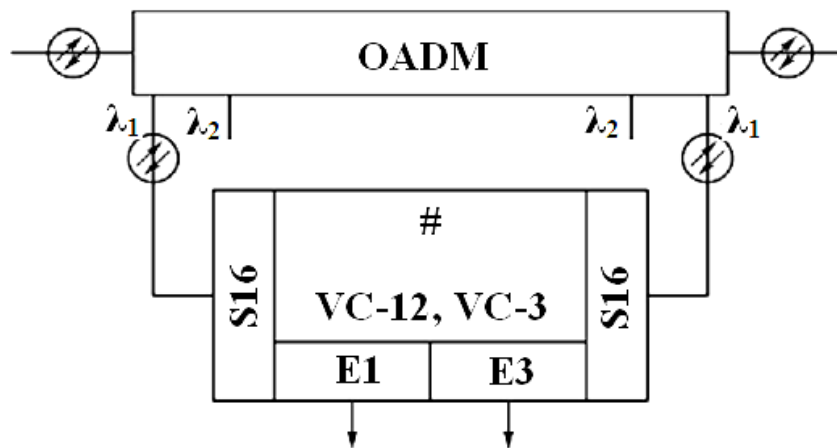


Рисунок 2.16 – Приклад спільного використання мультиплексора ADM та оптичного мультиплексора OADM

Ключовим вузлом ОТМ є оптичний мультиплексор виділення/вводу OADM, який забезпечує доступ до окремих хвильових каналів. Принципи побудови цих оптичних мультиплексорів базуються на використанні: волоконних брегівських решіток, що налаштовані на фіксовані хвилі та решіток на основі хвилеводного AWG-масиву.

## 2.7 Особливості будови та використання ROADM

Динамічні оптичні мультиплексори вводу/виводу (ROADM) в основному використовуються на проміжних вузлах для програмного вводу/виводу з групового оптичного каналу одного або декількох оптичних каналів. При цьому всі інші канали прозора проходять через цей транзитний вузол. При використанні ROADM в кільцевій архітектурі ОТМ вони мають конфігурацію E/W, що зображена на рисунку 2.17.

Для компенсації власних втрат оптичної потужності до складу ROADM входять оптичні підсилювачі.

Основними складовими динамічних ОМ є: WSS – селективні комутатори довжин хвиль та DMX – оптичні демультимплексори. Селективні комутатори довжин хвиль забезпечують введення, транзитне передавання та виділення оптичних каналів. Оптичні демультимплексори використовуються разом з селективними комутаторами та забезпечують виділення оптичних каналів.

Динамічні ОМ є пасивними компонентами ОТС і тому вони вносять значні втрати потужності оптичного сигналу у ВОЛТ, а саме:

- при введенні оптичних каналів 8 дБ;
- при транзиті оптичних каналів 12 дБ;
- при виведенні оптичних каналів 14 дБ.

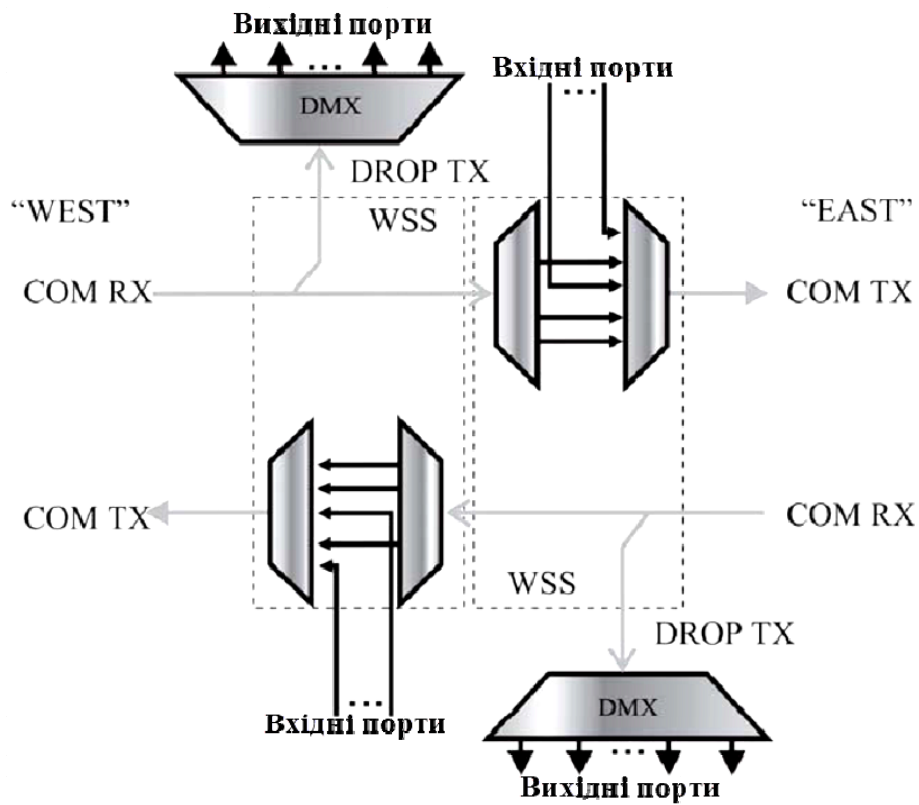


Рисунок 2.17 – Узагальнена структурна схема ROADM E/W

На рисунку 2.18 показано приклад використання динамічного ОМ в складі вузла вводу/виводу оптичних каналів ОТС.

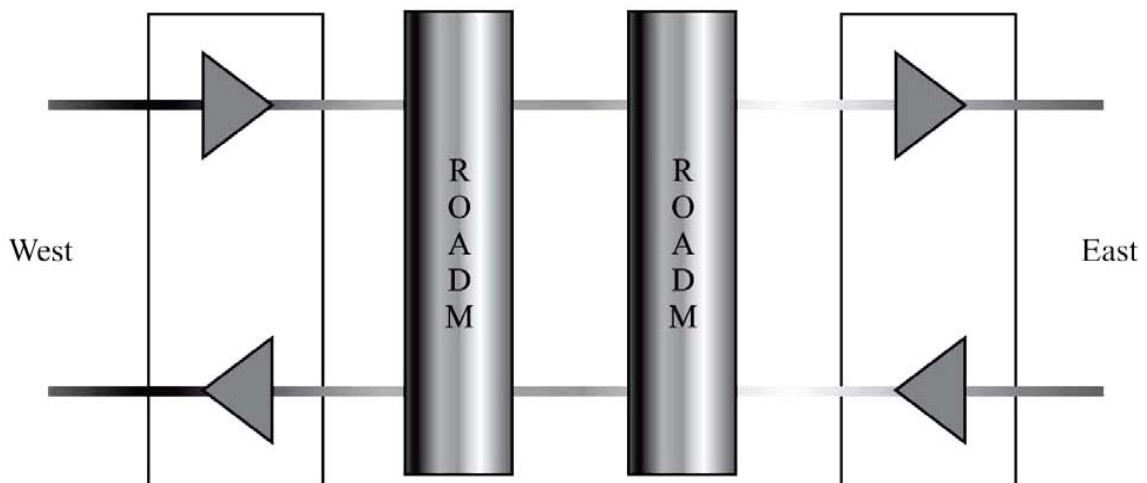


Рисунок 2.18 – Умови використання динамічного оптичного мультиплексора ROADM в складі вузла вводу/виводу ОТС

На рисунку 2.19 показано узагальнену схему оптичного мультиплексора OADM в режимі фіксованих хвиль.

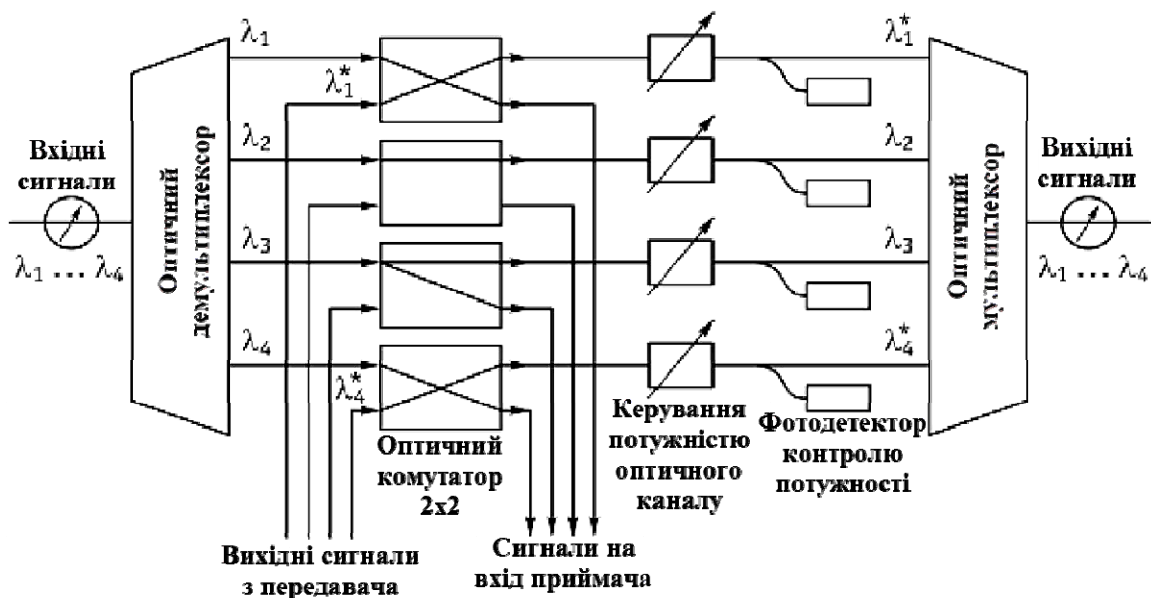


Рисунок 2.19 – Узагальнена схема оптичного мультиплексора OADM

Цей варіант оптичного мультиплексора OADM забезпечує виконання таких функцій:

- розподіл групового сигналу за допомогою вбудованого демультиплексора;
- заміну інформаційного трафіка шляхом виведення хвиль  $\lambda_1 \dots \lambda_4$  та введення на їх місце хвиль  $\lambda_1^* \dots \lambda_4^*$  з іншим трафіком;
- відгалуження частини оптичної потужності на хвилі  $\lambda_3$  та пропущення без доступу хвилі  $\lambda_2$ .

Реалізація особливостей OTM OTI забезпечується ієрархічною структурою побудови інтерфейсів в ОТС OTI, які складаються з електронних та оптичних модулів, що об'єднані в транспондерні блоки TPD та оптичні блоки OMX з функціями оптичної ретрансляції R (рис. 2.20).

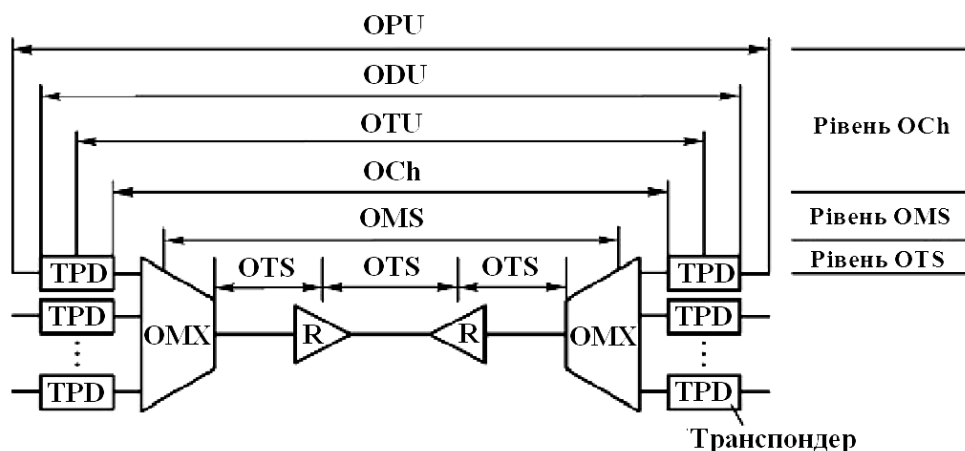


Рисунок 2.20 – Архітектура ділянки мережі OTM-OTI: TPD-транспондер

Через ці транспондерні блоки реалізуються функції рівня оптичного каналу OCh.

Всі перераховані функції забезпечують високоефективні та гнучкі режими роботи динамічних ОМ. Тому основними перевагами динамічних оптичних мультиплексорів ROADM є:

- можливість вводу/виводу інформаційних потоків з дистанційним контролем;
- додавання та пропускання хвиль без перетворень та з перетвореннями оптичного сигналу в електричний.

### **Контрольні завдання**

1. Вкажіть типи технологій мультиплексування, які використовуються в OTM.
2. Поясніть призначення компонентів xWDM.
3. Поясніть особливості використання DWDM-технології.
4. Поясніть принципи побудови та умови використання DWDM-мультиплексорів.
5. Вкажіть основні типи оптичних мультиплексорів та демультимплексорів та поясніть їх призначення.
6. Поясніть призначення, будову та умови використання динамічних оптичних мультиплексорів вводу/виводу.
7. Поясніть призначення, будову та умови використання термінальних мультиплексорів з лінійними портами WDM.
8. Поясніть призначення, будову та умови використання мультиплексорів вводу/виводу з електричними та оптичними закінченнями ADM.
9. Поясніть призначення, будову та умови використання оптичного мультиплексора з функціями OADM/ROADM/OXC.
10. Поясніть особливості будови та використання динамічних мультиплексорів ROADM.

## 3 БУДОВА ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОМПОНЕНТІВ ОТМ

### 3.1 Параметри ключових компонентів ОТС

Компоненти ТМ характеризуються великим набором функцій, інтерфейсів та умовами використання в складі АТС та вузлів. При цьому під елементом ОТМ необхідно розуміти блок з набором функцій для забезпечення взаємодії з іншими компонентами мережі та організації їх захисту, тестування та керування. На рисунку 3.1 зображено узагальнену структуру мережного елемента ОТМ.

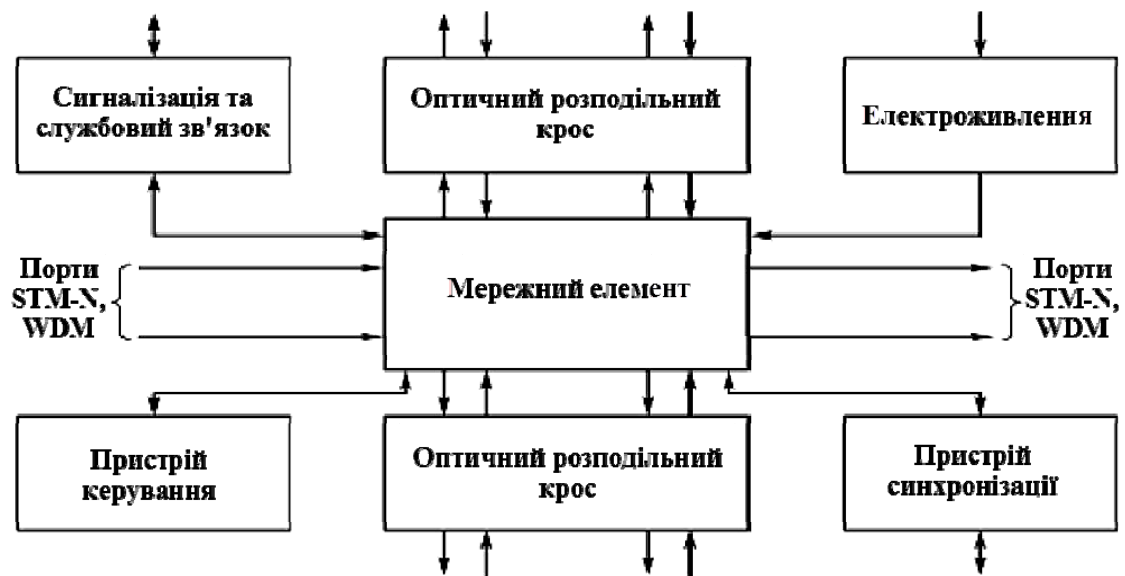


Рисунок 3.1 – Узагальнена структура мережного елемента ОТС

Мережними елементами є: електронний регенератор з оптичними інтерфейсами, ОП, мультиплексор вводу/виводу СЦІ, ОПІ, мультиплексор вводу/виводу багатохвильових сигналів OADM. До складу цих елементів входять різні лінійні закінчення (порти STM-N, WDM) та інтерфейси користувачів з електричним та оптичним терміналами (E1, E2, E4, STM-N, Ethernet, ATM). Надійну та ефективну роботу елементів мережі забезпечують системи керування, синхронізації та електроживлення, службовий зв'язок та сигналізація.

Потрібно відмітити, що всі компоненти ОТМ поділяються на типи згідно з їх функціональним призначенням:

- ОВ (середовище передавання оптичних сигналів);
- оптичні з'єднувачі, роз'єднувачі та об'єднувачі;
- пасивні та активні оптичні лінії затримки;
- оптичні перемикачі та комутатори;
- передавальні та приймальні оптоелектронні модулі;
- прийомопередавальні оптоелектронні модулі;

- оптичні ретранслятори;
- оптичні хвильові конвертери (транспондери);
- оптичні модулятори;
- оптичні лінійні інтерфейси.

Також всі вищеперераховані компоненти ОТС поділяються на одномодові, багатомодові та за умовами використання.

Оптичні лінійні інтерфейси є ключовими компонентами ОТС, які визначають пропускну здатність міжвузлових з'єднань та регламентовані міжнародними стандартами ІТУ-Т, ІЕЕЕ, ІСО/ОSІ (рис. 3.2).

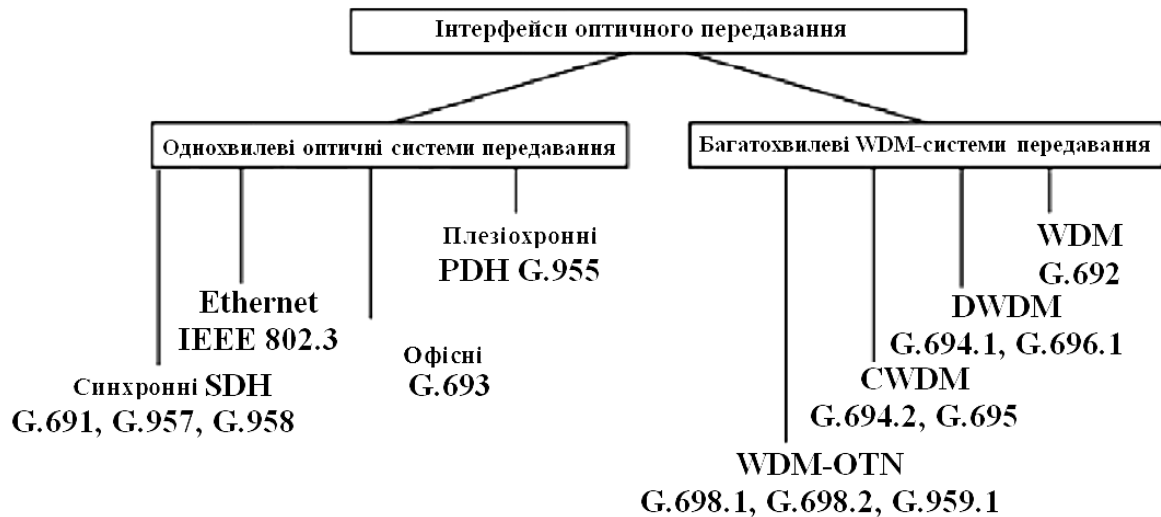


Рисунок 3.2 – Міжнародні стандарти на оптичні інтерфейси ОТС

Найпростішими типами оптичних інтерфейсів є однохвильові інтерфейси, які характеризуються спрощеними вимогами: до фіксації довжини хвилі випромінювання оптичного передавача, до параметрів потужності передавача та чутливості приймача, а також високою допустимою ймовірністю помилки на прийомі.

### 3.2 Особливості оптичних підсилювачів

Активними компонентами ОТС є пристрої, в яких виконується генерація, підсилення, перетворення та оброблення сигналів за рахунок енергії електроживлення або енергії оптичного випромінювання. До цих пристроїв належать:

- генератори оптичного випромінювання (напівпровідникові світлодіоди (СД), лазерні діоди (ЛД) або напівпровідникові лазери);
- оптичні підсилювачі;
- фотодетектори;
- хвильові конвектори;
- оптичні регенератори;
- напівпровідникові модулятори.

ОТС рівнів STM-16 та STM-64 можуть працювати на значних довжинах регенераційних ділянок (понад 300 км) при потужності випромінювання лазера не більше 2 мВт (3 дБм) за рахунок використання на передаванні та прийомі ВОЛТ оптичних підсилювачів. Використання проміжних (лінійних) оптичних підсилювачів дозволяє збільшити довжину регенераційних ділянок ВОЛТ до 1000 км (з використанням компенсаторів хроматичної дисперсії). В ОТС використовуються три типи оптичних підсилювачів:

- волоконно-оптичні підсилювачі на основі активних ОВ;
- волоконно-оптичні підсилювачі на основі звичайних з використанням оптичних нелінійних явищ (вимушеного комбінаційного розсіювання – стимульованого раманівського розсіювання (SRS), чотирихвильового зміщення);
- напівпровідникові оптичні підсилювачі.

Оптичний підсилювач виконує підсилення потужності оптичних сигналів в одному або двох зустрічних напрямках на 30–50 дБ без перетворення оптичного сигналу в електричний при використанні сигналу накачування  $\lambda_0$ .

В складі мережного компонента ОТМ оптичний підсилювач характеризується розподіленою конструкцією та має порти підключення до системи керування і оперативного контролю параметрів та оцінювання роботоздатності, як показано на рисунку 3.3.

Оптичні підсилювачі поділяються на 5 типів, які вказано в таблиці 3.1. Оптичні підсилювачі Фабрі-Перо забезпечують високий коефіцієнт підсилення (до 25 дБ) у вузькому частотному діапазоні (1 ГГц) з можливістю його перестроювання в більш ширший спектральний діапазон (800 ГГц). Ці ОП не чутливі до поляризації оптичного сигналу та характеризуються ефективним послабленням бокових спектральних складових (на 20 дБ) за межами діапазону 5 ГГц і тому вони можуть виконувати функції демультиплексорів xWDM-технології.

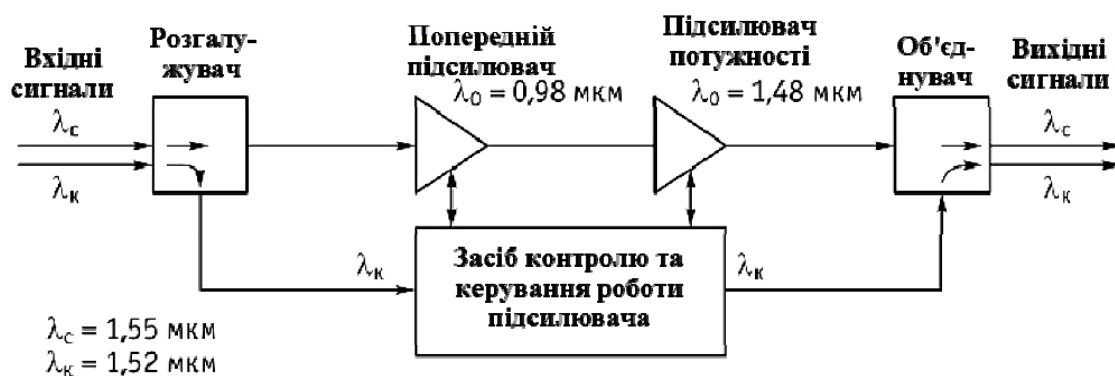


Рисунок 3.3 – Узагальнена схема мережного компонента ОТМ з оптичними підсилювачами

Оптичні підсилювачі на основі ОВ базуються на нелінійному ефекті, що виникає в ОВ за рахунок переходу енергії від оптичної хвилі на частоті  $f_1$  в енергію нової хвилі на зміщеній частоті  $f_2$ . Ці ОП підсилюють оптичний сигнал у вузькому діапазоні (приблизно 1,5 ГГц) на частоті  $f_2$  за рахунок брілюєнівського розсіювання завдяки енергії накачування на частоті  $f_1$ .

Оптичні підсилювачі на основі типових ОВ з використанням нелінійного ефекту (раманівського розсіювання) характеризуються ширшим робочим спектральним діапазоном та можуть забезпечити підсилення сигналів декількох xWDM-каналів. Недоліком цих ОП є значні перехідні завади між оптичними каналами.

Напівпровідникові лазерні підсилювачі будуються на основі подібного активного середовища, що використовується в напівпровідникових лазерах. Через наявність ряду суттєвих недоліків в їх параметрах вони не отримали широкого використання.

Таблиця 3.1 – Параметри оптичних підсилювачів, що використовуються в ОТМ

	Типи оптичних підсилювачів	Призначення оптичних підсилювачів
1	Оптичний підсилювач Фабрі-Перо	Підсилення сигналу одної робочої хвилі в одному оптичному каналі
2	Оптичні підсилювачі на основі брілюєнівського розсіювання	Підсилення сигналів в одному оптичному каналі
3	Раманівські оптичні підсилювачі	Підсилення сигналів декількох оптичних каналів
4	Напівпровідникові лазерні підсилювачі	Підсилення сигналів великої кількості оптичних каналів в широкому діапазоні робочих хвиль
5	EDFA оптичні підсилювачі	Підсилення сигналів великої кількості оптичних каналів в широкому діапазоні робочих хвиль

Оптичні підсилювачі на основі ОВ з домішками є найпоширенішими, оскільки дозволяють підсилити сигнал в широкому спектральному діапазоні.

При каскадному використанні цих ОП в складі ВОЛТ з DWDM-мультиплексорами через нерівномірності їх частотної характеристики в широкому діапазоні робочих довжин хвиль (1530–1560 нм) встановлюють хвилеві коректори для вирівнювання амплітуд мультиплексного сигналу на різних довжинах хвиль. Основним недоліком цих ОП є їх власний широко-смуговий шум.



В основному, використовуються 2 типи ОП на основі ОВ з домішками: ОП на основі кремнію та на фтор-цирконатній основі. Ці ОП мають робочий діапазон частот в межах діапазону оптичного випромінювання ербію (1530–1560 нм).

Довжина регенераційної ділянки обмежується наявністю затухання потужності багатохвильового оптичного сигналу в пасивних компонентах ОТМ. Мінімальне значення чутливості оптичного приймача вказує на мінімально можливе значення потужності оптичного сигналу в ВОЛТ. Для збільшення довжини регенераційної ділянки в ВОЛТ необхідно використовувати підсилення потужності оптичного сигналу за допомогою ОП, що вказані в таблиці 3.1.

На рисунку 3.4 показано залежність вихідної потужності ОП EDFA від потужності вхідного сигналу. З графіка видно, що значення вихідної потужності лінійно зростає при збільшенні рівня вхідного сигналу в межах від -40 до -20 дБм, а при подальшому збільшенні вхідної потужності понад 0 дБм виникає насичення і тоді підсилення в ОП зменшується. Тому, основними параметрами волоконно-оптичних підсилювачів є:

- діапазон робочих хвиль ( $\Delta\nu$ );
- значення коефіцієнта підсилення;
- значення потужності вхідного сигналу, при якому досягається насичення в ОП;
- максимальне значення вихідної потужності;
- значення коефіцієнта шуму;
- значення потужності залишкового випромінювання накачування;
- значення відбитої потужності на вході та виході ОП;
- нерівномірність коефіцієнта підсилення.

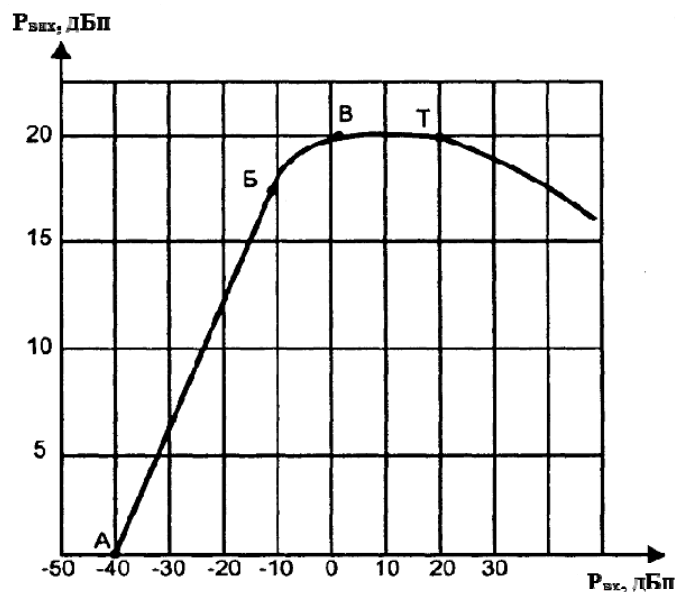


Рисунок 3.4 – Залежність вихідної потужності від вхідної потужності оптичного сигналу в ербієвому оптичному підсилювачі

Підсилення багатохвильового сигналу за рахунок використання ОП, як показано на рисунку 3.5 забезпечує можливість збільшити дальність передавання сигналів у ВОЛТ з технологією DWDM.

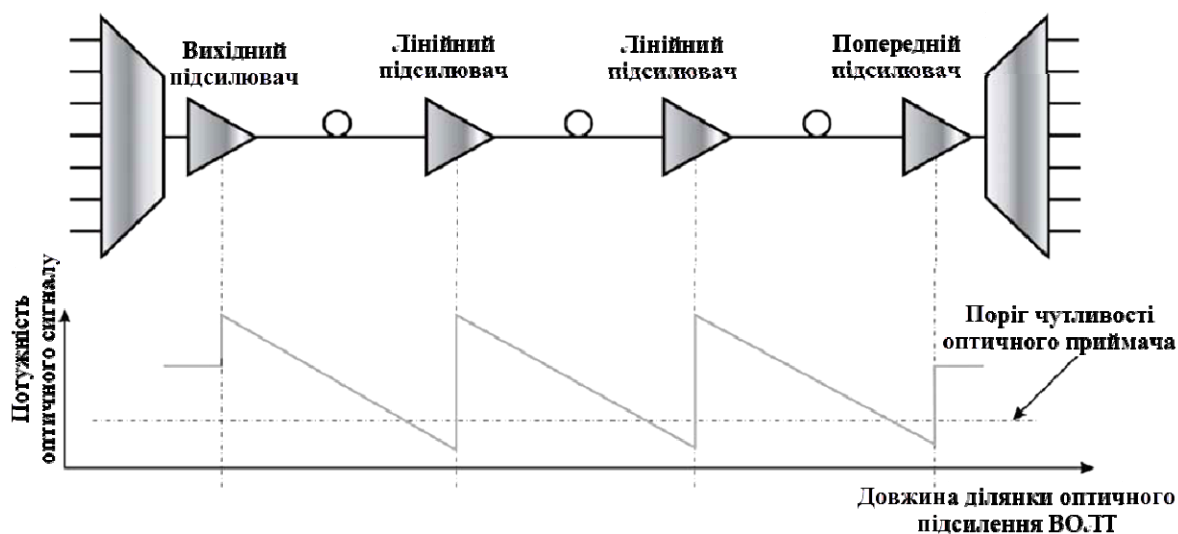


Рисунок 3.5 – Приклад збільшення довжини ВОЛТ з DWDM-технологією за рахунок використання ОП

Згідно з умовами використання в DWDM ОТС ОП поділяються на такі типи (рис. 3.6):

- вихідний оптичний підсилювач потужності (бустер) (BST) використовується на виході мультиплексорів або безпосередньо після лазерних передавачів (передавальних оптичних модулів) та забезпечує підсилення значення потужності багатохвильового оптичного сигналу на вході ВОЛЗ до більшого рівня, ніж той, який може бути досягнутий на виході лазерного діода;

- лінійний оптичний підсилювач (LA) використовується в проміжних пунктах довгих ВОЛТ з хвильовим спектральним ущільненням між регенераторами та забезпечує компенсацію втрат потужності багатохвильового оптичного сигналу в ОВ та інших компонентах ОТМ;

- попередній оптичний підсилювач (PA) використовується безпосередньо перед оптичним приймачем та забезпечує підсилення оптичного сигналу до рівня, який перевищує рівень чутливості оптичного приймача, що збільшує відношення сигнал/шум на його виході.

Потрібно відмітити, що послідовно з'єднані лінійні ОП призводять до накопичення внесеного шуму від кожного ОП, що обмежує їх кількість на регенераційній ділянці та максимально допустиму відстань між ними. В основному, в DWDM-системах використовуються 2 типи ОП: ербієві волоконні підсилювачі (EDFA) та раманівські волоконні підсилювачі (RA).

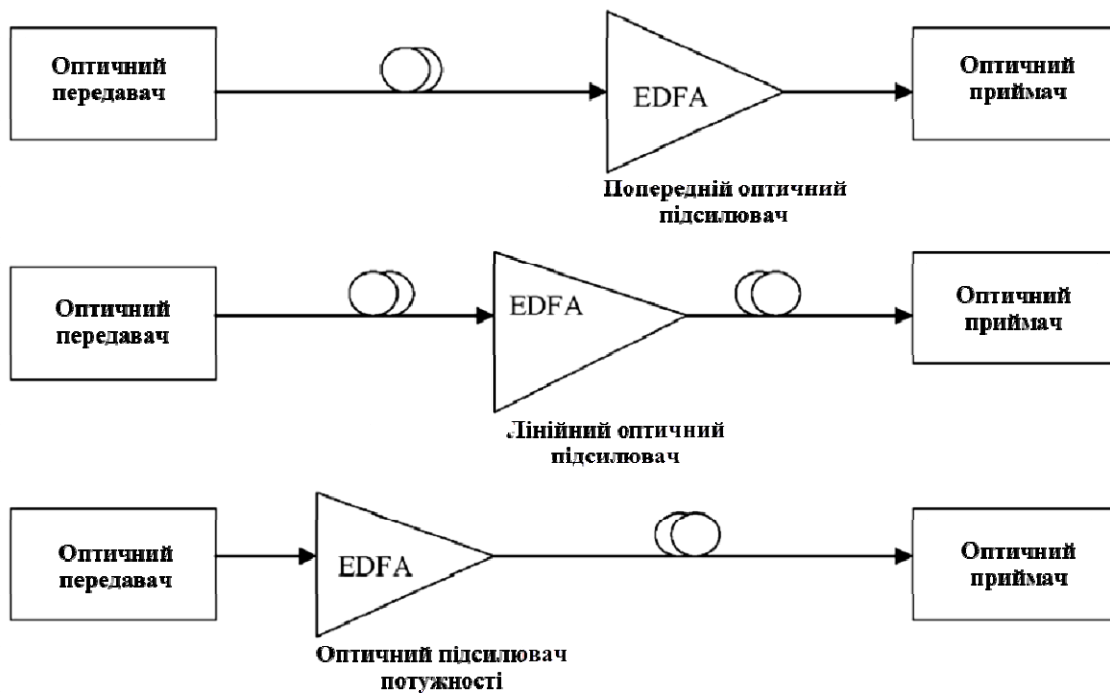


Рисунок 3.6 – Типи ОП EDFA

Ширина та рівномірність смуги пропускання, динамічний діапазон та інші характеристики цих ОП напряму залежать від параметрів активованого ОБ (довжини, діаметра, розподілу іонів ербію, ступеня однорідності накачування), а також топології ОП. Тому в DWDM-системах для вирівнювання спектра підсилення використовуються багатокаскадні ербієві ОП з додатковим використанням оптичних фільтрів.

### 3.3 Особливості будови та використання EDFA-підсилювачів

Як активне середовище для ОП EDFA використовується відрізок ОБ, що легований ербієм. Принцип роботи ербієвого підсилювача базується на явищі підсилення світлового потоку за рахунок примусового випромінювання. Ширина спектральної смуги підсилення ербієвих волоконних підсилювачів дорівнює приблизно 80 нм (С- та L-діапазони).

Оптичне накачування в ОП забезпечує збудження іонів ербію та здійснюється за допомогою лазера накачування по 3 варіантах на довжинах хвиль, що попадають в одну з смуг поглинання: 980 нм, 1480 нм.

Варіанти схем накачування ербієвих ОП:

- однонаправлене накачування, при якому підсилений сигнал та сигнал накачування поширюється в одному напрямку;
- зустрічне накачування, при якому підсилений сигнал та сигнал накачування поширюються в протилежних напрямках;
- двонаправлене накачування дозволяє використовувати два джерела накачування, що підвищує сумарну потужність накачування.

В DWDM-системах часто використовуються двокаскадні ербієві ОП, коефіцієнт шуму яких можна визначати згідно з формулою:

$$K_{\text{ш.зар.}} = K_{\text{ш1}} + \frac{K_{\text{ш2}} - 1}{G_{A1}},$$

де  $K_{\text{ш1}}$  – коефіцієнт шуму першого каскаду ОП;

$K_{\text{ш2}}$  – коефіцієнт шуму другого каскаду ОП;

$G_{A1}$  – коефіцієнт підсилення потужності першого каскаду.

Згідно з даним виразом, перший каскад двокаскадного ОП повинен мати мінімальне значення коефіцієнта шуму  $K_{\text{ш1}}$  та високе значення коефіцієнта підсилення потужності  $G_{A1}$ , а другий каскад повинен мати найбільше значення вихідної потужності та високу ефективність накачування.

Оскільки, найменшим значенням коефіцієнта шуму характеризуються ОП з однонаправленим накачуванням на довжині хвилі 980 нм, то саме такі ОП використовуються як перший каскад в двокаскадних ОП. Оскільки найбільшу ефективність накачування та найбільшу вихідну потужність мають ОП з використанням зустрічного накачування на довжині хвилі 1480 нм, то такі ОП доцільно використовувати як другий каскад в двокаскадних ОП.

Перевагами ербієвих ОП є:

- ефективна схема накачування;
- мінімальна залежність від поляризації світла;
- висока вихідна потужність;
- низький рівень шуму;
- мінімальні внесені спотворення та перехресні завади.

Недоліки ербієвих ОП:

- вузький діапазон робочих частот, який займає лише діапазони С та L;
- менш ефективні при їх використанні в складі багатоканальних ОТС порівняно з рamanівськими ОП.

Використання регенераторів оптичних сигналів на довгих магістральних ВОЛТ забезпечує їх надійну роботу та низьке значення коефіцієнта помилок. Для підвищення ефективності роботи довгих ВОЛТ при заданому коефіцієнті помилок виконується встановлення в такі ВОЛТ об'єднаних з регенераторами ОП, що забезпечує компенсування втрат потужності оптичного сигналу (рис. 3.7).

На відміну від регенераторів, параметри ОП не залежать від бітової швидкості інформаційного сигналу, що дозволяє гнучко нарощувати пропускну здатність ВОЛТ до значення, що обмежується хроматичною та поляризаційною модовою дисперсією.

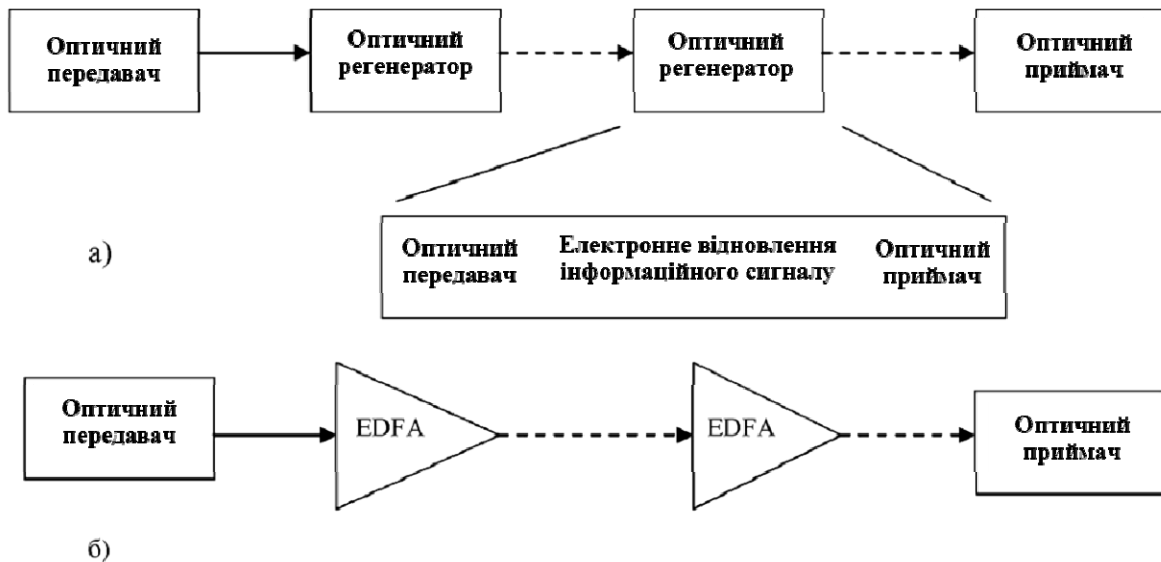


Рисунок 3.7 – Приклади використання оптичних регенераторів та ОП

За рахунок власної широкої робочої смуги частот ОП EDFA можуть підсилювати багатоканальний DWDM-сигнал, що спрощує побудову довгих ВОЛТ через відсутність великої кількості регенераторів. Необхідно враховувати, що, на відміну від регенераторів, ОП вносять у ВОЛТ додатковий шум і тому основними параметрами ОП EDFA є коефіцієнт підсилення, коефіцієнт шуму, потужність насичення та потужність спонтанного випромінювання.

### 3.4 Особливості будови та використання раманівських ОП

В основі функціонування раманівських ОП є явище примусового комбінаційного розсіювання (ПКР). При цьому підсилення оптичного інформаційного сигналу відбувається у випадку, коли оптичний сигнал поширюється в ОВ разом з інтенсивною хвилею накачування, а довжина його хвилі лежить в смузі частот комбінаційного розсіювання в ОВ. Явище примусового комбінаційного розсіювання виникає тоді, коли потужність накачування перевищує порогове значення (для кварцового одномодового ОВ – 600 мВт). При цьому енергія накачування переходить в так звану стоксову компоненту, яка зміщена в сторону більш довгих хвиль на 104 нм. Тому, якщо в стандартне ОВ ввести випромінювання накачування потужністю 600 мВт на довжині хвилі 1480 нм, то перша стоксова компонента виникає на довжині хвилі 1584 нм.

Раманівські ОП характеризуються такими перевагами:

- висока ефективність (відношення коефіцієнта підсилення до ширини смуги робочих частот) при великих потужностях накачування дозволяє використовувати ці ОП в багатоканальних ОТС;

- низький рівень шумів та використання як активне середовище для цих ОП стандартного ОВ (G.652, G.654 або G.655) забезпечують можливість їх використання на довгих регенераційних ділянках ВОЛТ;
- ширина спектра підсилення цих ОП залежить від довжини хвилі сигналу накачування, тому підбором джерел накачування можна розширити ширину смуги підсилення до 200 нм на діапазони (S, C, L) від 1300 нм до 1600 нм;
- раманівські ОП мають менший рівень шумів, ніж ербієві ОП.

Основним недоліком цих ОП є їх невисока ефективність перетворення, що потребує використання потужного неперервного сигналу накачування (потужністю приблизно 1 Вт) для отримання типового для оптичних систем зв'язку значення підсилення сигналу – 30 дБ.

Коефіцієнт підсилення раманівського підсилювача (дорівнює різниці значень сигналу на прийманні за наявності та відсутності сигналу накачування) прямопропорційно залежить від потужності випромінювання накачування, довжини і типу стандартного ОВ.

Узагальнену схему раманівського ОП із зустрічним накачуванням показано на рисунку 3.8.

Призначення компонентів в раманівському ОП є аналогічним як в ербієвих ОП, за винятком того, що роль активного середовища в цих ОП виконує стандартне ОМ ОВ, для збудження якого використовується випромінювання накачування великої потужності.

Широкосмугові раманівські ОП забезпечують підсилення багатохвильового DWDM-сигналу та сигналу оптичного каналу контролю і керування (OSC), ввід та виведення якого здійснюється фільтрами OSC (рис. 3.8).

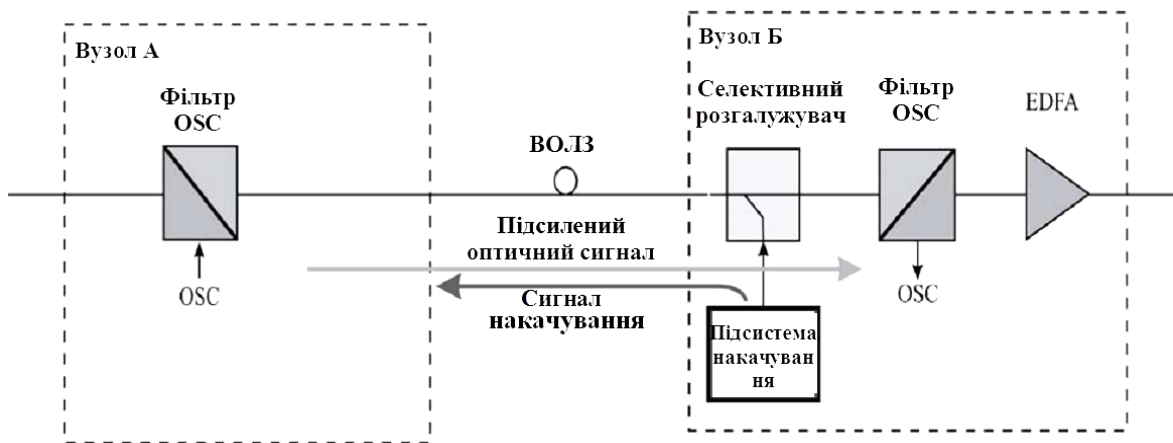


Рисунок 3.8 – Узагальнена схема раманівського ОП із зустрічним накачуванням

Для формування сигналу накачування підвищеної потужності використовуються різні схеми складання потужностей джерел накачування. Поток оптичних сигналів накачування попарно мультиплекуються в поляри-

заційних мультиплексорів та об'єднуються в двоканальному WDM-мультиплексорі. В результаті, вихідна потужність WDM-мультиплексора дорівнює сумі потужностей чотирьох лазерних джерел накачування. Для збільшення потужності накачування використовують схеми двонаправленого накачування (рис. 3.9).

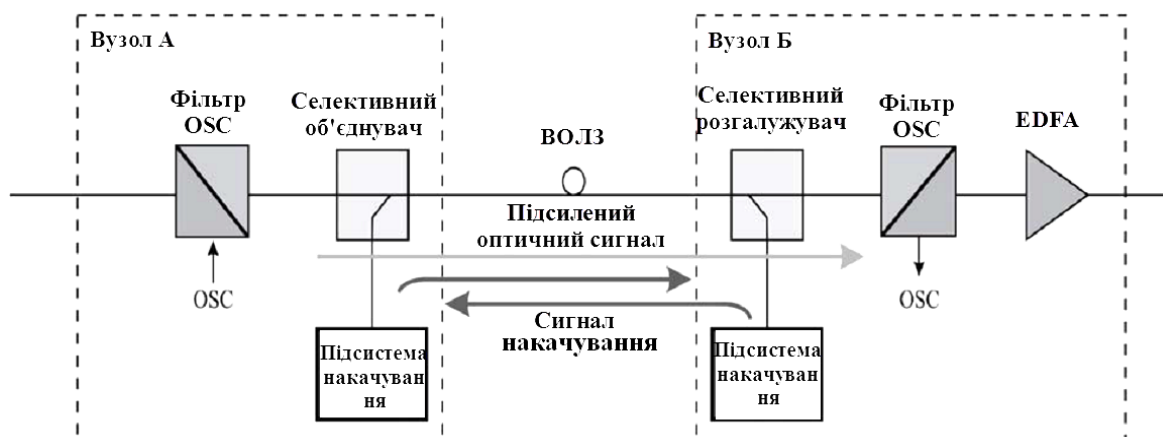


Рисунок 3.9 – Узагальнена схема раманівського ОП з двостороннім накачуванням

Принцип дії раманівського ОП (РА) базується на використанні нелінійного ефекту примусового комбінаційного розсіювання (раманівського), що забезпечує розподілене підсилення вздовж телекомунікаційного ОВ.

### 3.5 Особливості використання оптичних інтерфейсів ОТС

Основними параметрами оптичних інтерфейсів однохвильових ОТС, які визначають довжину та швидкодію їх ВОЛТ при заданій ймовірності помилок  $\epsilon$ :

- динамічний діапазон робочих довжин хвиль;
- динамічний діапазон потужності оптичного передавача;
- мінімальна чутливість приймача оптичного сигналу;
- поріг перевантаження оптичного приймача;
- вид модуляції носійного сигналу;
- тип лінійного коду;
- максимальна дисперсія між передавачем та приймачем;
- ширина спектра випромінювання передавача.

Потрібно відмітити, що лінійні оптичні інтерфейси ОТС СЦІ поділяються на типи згідно з умовами їх призначення:

- I – для короткої офісної ЛЗ;
- S – для короткої ЛЗ;
- L – для довгої ЛЗ;
- V – для дуже довгої ЛЗ;

- U – для наддовгої ЛЗ;
- VSR – для дуже коротких ЛЗ (перемички).

До складу лінійних інтерфейсів V- та U-типів можуть входити ОП потужності (Booster) на передавання та попередні ОП на прийманні ВОЛТ.

На рисунку 3.10 показано приклад використання оптичних лінійних інтерфейсів обладнання СЦІ: послідовний інтерфейс (SPI); фізичний інтерфейс СЦІ з можливостями підключення до ОВ та ОП (SDH PI); інтерфейс не закінчення секції регенерування (RST).

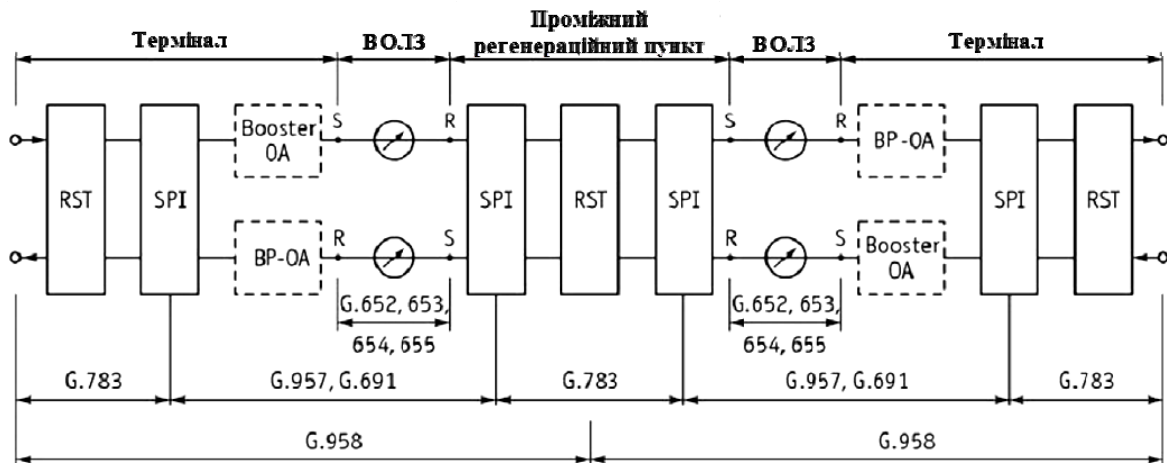


Рисунок 3.10 – Приклад використання інтерфейсів обладнання СЦІ

Розрахунок довжини регенераційної ділянки ВОЛТ при використанні однохвильових оптичних інтерфейсів (G.655) можна виконувати з урахуванням енергетичного потенціалу ВОЛЗ згідно з узагальноною формулою:

$$L_{рд} = \frac{P_S - P_R - P_D - M_e - (N - 1) \cdot I_{р.ст} - N_b \cdot I_{буд}}{\alpha_c + \alpha_m},$$

де  $P_S$  – потужність оптичного сигналу на виході передавача;

$P_R$  – потужність оптичного сигналу на вході приймача;

$P_D$  – втрати потужності внаслідок впливу дисперсії;

$M_e$  – енергетичний запас по потужності на старіння обладнання;

$N_b$  – кількість будівельних довжин кабелю;

$I_{буд}$  – будівельна довжина оптичного кабелю (від 2 до 7 км);

$I_{р.ст}$  – втрати потужності на роз'ємних стиках;

$\alpha_c$  – кілометричне загасання кабелю на заданій довжині хвилі;

$\alpha_m$  – запас на пошкодження.

Потрібно відмітити, що максимальна довжина регенераційної ділянки визначається з урахуванням загасання у тракті та дисперсії: вибирається



менше значення. Тому, визначення довжини регенераційної ділянки з урахуванням енергетичних втрат зручно виконувати згідно з узагальненою схемою регенераційної ділянки ОТС, що зображена на рисунку 3.11.

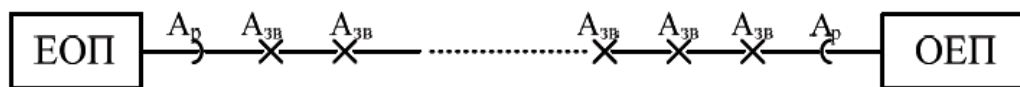


Рисунок 3.11 – Узагальнена структура регенераційної ділянки ОТС

Максимальна довжина регенераційної ділянки ОТС визначається за формулою:

$$l_{p\alpha} = \frac{Q - \Delta p_{\text{зап}} - 2A_p - N \cdot A_{\text{зв}}}{\alpha},$$

де  $Q$  – енергетичний потенціал обладнання ОТМ;

$\Delta p_{\text{зап}}$  – запас, який закладається з урахуванням збільшення втрат під час експлуатації;

$A_p$  – загасання на рознімному стику;

$A_{\text{зв}}$  – загасання на зварному стику;

$N$  – кількість зварних стиків;

$\alpha$  – коефіцієнт загасання ОВ.

Прийmemo, що використовується оптичний кабель з однаковими будівельними довжинами  $l_{\text{буд}} = \text{const}$  та коефіцієнтом загасання  $\alpha = \text{const}$ . Тоді кількість зварних стиків в оптичному кабелі дорівнює:

$$N = \frac{l_{p\alpha}}{l_{\text{буд}}} - 1.$$

Підставимо в формулу числові значення, отримаємо такий вираз:

$$l_{p\alpha} = \frac{Q - \Delta p_{\text{зап}} - 2A_p - \left( \frac{l_{p\alpha}}{l_{\text{буд}}} - 1 \right) \cdot A_{\text{зв}}}{\alpha}.$$

Після виконання перетворень, отримаємо:

$$l_{p\alpha} = \frac{Q - \Delta p_{\text{зап}} - 2A_p + A_{\text{зв}}}{\alpha + \frac{A_{\text{зв}}}{l_{\text{буд}}}}.$$

Потрібно відмітити, що різницю  $(2A_p - A_{зв})$  іноді позначають як додаткове загасання:

$$A_{\text{дод}} = 2A_p - A_{\text{зв}}.$$

Остаточна формула для визначення довжини регенераційної ділянки з урахуванням бюджету потужності:

$$l_{\text{ра}} = \frac{Q - \Delta p_{\text{зап}} - A_{\text{дод}}}{\alpha + \frac{A_{\text{зв}}}{l_{\text{буд}}}}.$$

Довжину регенераційної ділянки з урахуванням дисперсії оптичних сигналів у ОВ необхідно визначати за формулою:

$$l_{\text{рс}} = \frac{0,25}{\sigma \cdot \Delta\lambda \cdot F},$$

де  $\sigma$  – питома хроматична дисперсія ОВ на робочій довжині хвилі;

$\Delta\lambda$  – ширина спектра джерела випромінювання;

$F$  – тактова частота обладнання ОТМ, Гц.

**Приклад.** Розрахувати довжину регенераційної ділянки ОТМ СЦІ, на якій застосовуються мультиплексори рівня STM-4. Енергетичний потенціал обладнання рівня STM-4  $Q = 24$  дБ; коефіцієнт загасання ОВ  $\alpha = 0,22$  дБ/км; будівельна довжина оптичного кабелю  $l_{\text{буд}} = 4$  км; хроматична дисперсія  $\sigma = 17$  пс/(нм·км); ширина спектра джерела випромінювання  $\Delta\lambda = 0,3$  нм; тактова частота обладнання рівня STM-4  $F = 622,08$  МГц.

Прийнявши експлуатаційний запас  $\Delta p_{\text{зап}} = 6$  дБ; додаткове загасання  $A_{\text{дод}} = 1$  дБ та загасання на зварному стику  $A_{\text{зв}} = 0,3$  дБ, визначимо довжину регенераційної ділянки з урахуванням енергетичних втрат:

$$l_{\text{ра}} = \frac{Q - \Delta p_{\text{зап}} - A_{\text{дод}}}{\alpha + \frac{A_{\text{зв}}}{l_{\text{буд}}}} = \frac{24 - 6 - 1}{0,22 + \frac{0,3}{4}} = 57,6 \text{ дБ}.$$

Розрахуємо довжину регенераційної ділянки з урахуванням дисперсії за формулою:

$$l_{\text{psc}} = \frac{0,25}{\sigma \cdot \Delta\lambda \cdot F} = \frac{0,25}{17 \cdot 0,3 \cdot 622,08 \cdot 10^6} = 78,8 \text{ км.}$$

Таким чином, довжина регенераційної ділянки з урахуванням втрат дорівнює 57,6 км, а з урахуванням хроматичної дисперсії – 78,8 км. Висновок: у даному випадку довжина регенераційної ділянки буде 57,6 км.

Потрібно відмітити, що використання функції корекції помилок (FEC) в оптичних інтерфейсах (U-64.2, 10GBASE-EW) додатково підвищує енергетичний потенціал ВОЛТ на 3 – 8 дБм та забезпечує гнучке регулювання їх робочої довжини.

Для оптичних інтерфейсів визначено нормовані значення максимальної дисперсії оптичного сигналу в ОВ типу G.652 (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Нормування максимальної дисперсії для оптичного волокна типу G.652

Код використання інтерфейсу	L	V	U	nV3-y.z	mL5-y.z	nV5-y.z	nL8-y.z
Максимальна дисперсія, пс/нм	1600	2400	3200	7200	8000	12000	12800

В таблиці 3.3 вказані максимальні значення втрат потужності оптичного сигналу в ВОЛТ між ОП.

Таблиця 3.3 – Значення втрат потужності оптичного сигналу в ВОЛТ між ОП

Код використання інтерфейсу	nL-y.z	nV-y.z	nU-y.z	nLx-y.z	nVx-y.z
Максимальне затухання, дБ	22	33	44	22	33

На рисунку 3.12 показано структуру нормування параметрів ОІ, згідно з рекомендацією G.692.

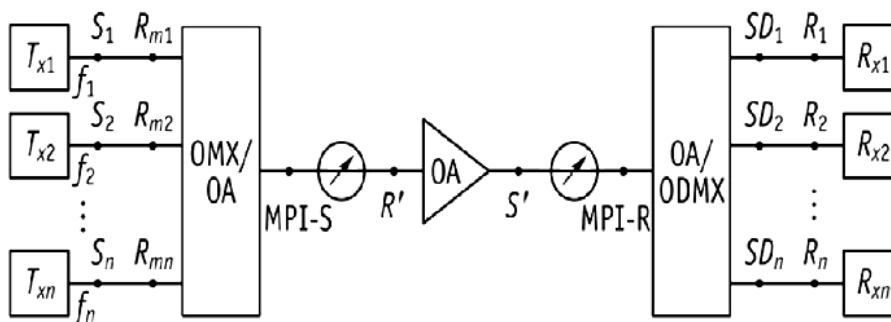


Рисунок 3.12 – Структура нормування параметрів ОІ багатохвильових ОТС

$S_1 \dots S_n$  – точки підключення оптичних з'єднувальних кабелів до оптичних каналних передавачів  $T_{x1} \dots T_{xn}$  з урахуванням їх робочих частот  $f_1 \dots f_n$ .

$R_{m1} \dots R_{mn}$  – точки підключення оптичних з'єднувальних кабелів до оптичного мультиплексора об'єднаного з ОП.

MPI-S – точка підключення оптичного мультиплексора з підсилювачем до ВОЛЗ.

$S', R$  – точки підключення проміжних ОП у ВОЛТ.

MPI-R – точка підключення попереднього ОП об'єднаного з демультиплексором ODMX до ВОЛЗ.

$SD_1 \dots SD_n$  – точки підключення з'єднувальних оптичних кабелів до оптичного демультиплексора.

$R_1 \dots R_n$  – точки підключення з'єднувальних оптичних кабелів до оптичних приймачів  $R_{x1} \dots R_{xn}$ .

Потрібно відмітити, що на всіх вищеперерахованих підключеннях використовуються роз'ємні з'єднувачі – конектори. За аналогічною схемою (рис. 3.18) виконуються підключення обладнання багатохвильових ОТС-технологій OTI, DWDM та CWDM.

Приклади кодування оптичних інтерфейсів (G.692) наведено в таблиці 3.4 та виконані згідно з правилом:

$$nWx-y,z,$$

де  $n$  – значення максимальної кількості робочих хвиль або оптичних каналів;

$W$  – значення довжини ВОЛЗ ( $L$  – довга,  $V$  – дуже довга,  $U$  – наддовга);

$x$  – кількість ділянок підсилення;

$y$  – рівень ієрархії STM-N;

$z$  – тип ОБ (індекси 2, 3, 5 відповідають стандартам ОБ, які вказано в рекомендаціях G.652, G.653, G.655).

Таблиця 3.4 – Приклади кодування WDM оптичних інтерфейсів

Призначення	Довга ВОЛЗ (L) (80 км)		Дуже довга ВОЛЗ (V) (120 км)	
	5	8	3	5
Кількість ділянок оптичного підсилення	5	8	3	5
чотириканальна ОТС	4L5-y,z	4L8-y,z	4V3-y,z	4V5-y,z
восьмиканальна ОТС	8L5-y,z	8L8-y,z	8V3-y,z	8V5-y,z
шістнадцятиканальна ОТС	16L5-y,z	16L8-y,z	16V3-y,z	16V5-y,z

Приклади кодування CWDM оптичних інтерфейсів (G.695) наведено в таблиці 3.5 та виконані згідно з правилом:

$$B(S)-C_nW_x-ytz,$$

- де В – двостороннє передавання в одному ОВ;  
S – використання (black-link) архітектури;  
С – кількість ділянок підсилення;  
n – значення максимальної кількості хвильових каналів (до 18);  
W – довжина ВОЛТ (S – короткий, L – довгий);  
x – кількість ділянок підсилення;  
y – тип інформаційного потоку (0 – NRZ 1,25 Гбіт/с, 1 – NRZ 2,5 Гбіт/с);  
t – будова інтерфейсу (A – наявність в складі ОП потужності на передаванні та попереднього ОП на прийомі, B – наявність лише ОП потужності на передаванні, C – наявність тільки попереднього ОП на прийомі, D – відсутність ОП в складі оптичних інтерфейсів);  
z – тип ОВ (індекси 2, 3, 5 відповідають стандартам ОВ, що визначені специфікаціями G.652, G.653, G.655).
- Правила кодування оптичних інтерфейсів багатохвильових ОТС визначені в рекомендації G.959.1 та виконуються згідно з виразом:

$$P_nW_x-ytz,$$

- де P – показник використання в ОТМ;  
n – значення максимальної кількості хвильових каналів згідно з рекомендацією G.694.1;  
W – значення максимальної довжини регенераційної ділянки ВОЛТ (VSR – дуже короткі ділянки (перемички в обладнанні), I – офісні з'єднання (перекривне затухання 0 – 7 дБ), S – короткі відстані (затухання до 11 дБ), L – довгі лінії (затухання до 22 дБ), V – дуже довгі лінії (затухання до 33 дБ); x – кількість ділянок підсилення; y – тип інформаційного потоку (1 – NRZ 2,5 Гбіт/с, 2 – NRZ 10 Гбіт/с); t – особливості будови оптичного інтерфейсу (A – наявність ОП на передаванні та прийомі, B – наявність тільки ОП потужності на передаванні, C – наявність тільки попередніх ОП на прийомі, D – відсутність ОП в складі оптичних інтерфейсів); z – значення робочих хвиль та типів ОВ (1 – для хвилі 1310 нм та ОВ (G.652), індекси 2, 3, 5 відповідають стандартам ОВ, які визначені в рекомендаціях G.652, G.653, G.655 для хвиль 1550 нм).

Найбільш важливим системним параметром для багатохвильових ОТС є оптичне співвідношення сигнал/шум (OSNR). Цей критерій узагальнює всі основні параметри ВОЛТ, а саме: кількість хвильових каналів, довжину ВОЛЗ, кількість ОП та лінійність їх характеристик, коефіцієнт помилок

BER, нелінійні оптичні ефекти та визначається згідно з формулою (для одного оптичного каналу):

$$OSNR = P_{ch} - a_s - NF - 10 \lg M_{оп} + 58,$$

де  $P_{ch}$  – мінімально допустиме значення потужності оптичного сигналу в одному каналі ОТС;

$a_s$  – значення підсилення ОП;

NF – коефіцієнт шуму ОП (для EDFA 5 – 6 дБ);

$M_{оп}$  – кількість ОП у ВОЛТ між оптичними мультиплексорами;

58 дБ – нормоване значення потужності квантового шуму в смузі частот оптичного каналу на вході ОП.

Таблиця 3.5 – Приклади позначень восьмиканальних CWDM-інтерфейсів

Умови використання оптичного інтерфейсу			
Специфікація оптичного волокна	G.652	G.652	G.653
Позначення оптичного інтерфейсу	-	B-C8L1-0D2	B-C8L1-0D3
Довжина ВОЛТ при передаванні інформаційного сигналу в NRZ-кодi (при швидкості 1,25 Гбіт/с), км	-	64	64
Позначення оптичного інтерфейсу	C8S1-1D2 B- C8S1-1D2	C8L1-1D2 B- C8L1-1D2	B-C8L1-1D3
Довжина ВОЛТ при передаванні інформаційного сигналу в NRZ-кодi (при швидкості 2,5 Гбіт/с), км	27	55	58

Розрахунок кількості ділянок підсилення між мережними вузлами можна виконати за формулою:

$$N_p = \frac{L_{екд}}{l_p},$$

де  $L_{екд}$  – протяжність елементарної кабельної ділянки, км;

$l_p$  – довжина регенераційної ділянки, (48,6 км).

Підставимо значення у формулу та отримаємо кількість підсилювальних ділянок при загальній довжині ВОЛТ 750 км:

$$N_{p A \rightarrow B} = \frac{750}{48,6} = 16.$$

Розрахунок загасання на кабельній ділянці. Для визначення параметрів оптичних підсилювачів і настроювання їх в процесі інсталяції необхідно розрахувати затухання на елементарних кабельних ділянках.

Розрахунок сумарного загасання містить загасання блока інтерфейсу оптичних волокон, який слугує для введення/виведення службового каналу на підсилювальних пунктах.

Розрахунок загасання для всіх ЕКД мережі:

$$A_{\text{ЕКД}}(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot L_{\text{ЕКД}} + \alpha_3 \cdot n_3 + \alpha_p \cdot n_p + 2 \cdot A,$$

де  $\alpha(\lambda)$  – коефіцієнт загасання оптичного волокна на довжині хвилі  $\lambda$ ;

$L_{\text{ЕКД}}$  – протяжність ЕКД;

$\alpha_3$  – загасання на зварних з'єднаннях;

$n_3$  – кількість оптичних муфт;

$\alpha_p$  – загасання на оптичних рознімних з'єднаннях;

$n_p$  – кількість оптичних рознімних з'єднань;

$A$  – загасання, що вноситься блоком інтерфейсу оптичних волокон.

Загасання зварних з'єднань в оптичних муфтах на магістральних мережах зв'язку нормується таким чином: на довжині хвилі 1550 нм, у 100% випадків – загасання < 0,1 дБ; у 50% випадків – загасання < 0,05 дБ.

Розрахунок кількості оптичних муфт на ЕКД проводиться за формулою:

$$n_3 = \text{int} \left( \frac{L_{\text{ЕКД}}}{L_{\text{бд}}} \right) - 1,$$

де  $L_{\text{бд}}$  – будівельна довжина оптичного кабелю;

int – округлення до більшого цілого.

Користуючись даною формулою, можна знайти кількість оптичних муфт на ВОЛТ проектованої ОТМ.

Норма загасання рознімних з'єднувачів становить  $\alpha_p \leq 0,5$  дБ. Кількість рознімних з'єднувачів можна вважати рівною 4-м на кожній ЕКД, що відповідає точкам підключення ВОСП-СР або оптичного підсилювача до кросового обладнання. Максимальне загасання, внесене блоком інтерфейсу оптичного волокна, в С-діапазоні становить 1,5 дБ.

Розраховані значення загасання в тракті занесемо у таблицю 3.6.

Кількість оптичних підсилювачів, яка потрібна для успішного передавання сигналу на заданих ділянках тракту, розраховується:

$$Z_{\text{оп}} = \frac{A_{\text{ЕКД}}}{P_{\text{оп}}},$$

де  $A_{\text{ЕКД}}$  – загасання ЕКД мережі;

$P_{\text{оп}} = 20$  дБ – потужність підсилення оптичного підсилювача.

Розраховані значення кількості ОП, які потрібні на ділянках тракту, занесемо у таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Значення загасання в ВОЛТ та кількість ОП

Ділянка	$A_{\text{ЕКД}}$ , дБ	$Z_{\text{оп}}$
ВОЛТ	282,5	15

Розрахувавши довжину регенераційної ділянки, потрібно проаналізувати відстані (по ОК) між мережними вузлами. У нашому випадку довжини мультиплексних секцій більші розрахованої довжини регенераційної ділянки, тому потрібно застосовувати проміжні регенераційні пункти у вигляді оптичних підсилювачів на передаванні (бустерів) на проєктованій ОТМ. Необхідно також застосувати компенсатори хроматичних дисперсій для покращення якості сигналів, які передаються. Їх необхідно встановлювати з кожним другим ОП, оскільки типові компенсатори забезпечують дальність роботи 100 км.

**Приклад.** Важливим фактором деградації оптичного сигналу ВОЛП є шум, внесений оптичними підсилювачами. Таким чином, необхідним етапом при реконструкції ВОЛП є оцінювання якості передавання шляхом контролю співвідношення оптичний сигнал/шум (OSNR) [6, 7].

Необхідно визначити OSNR в точках головного оптичного тракту MPI-S, MPI-R.

Якщо шумом бустера можна знехтувати (загасання на підсилювальній ділянці набагато більше коефіцієнта посилення бустера) для розрахунку можна використати вираз:

$$\text{OSNR} = P_{\text{кн}} - A_{\text{ЕКД}} - NF - 10\lg(N_{\text{ЕКД}}) - 10\lg(h \cdot f \cdot \Delta f_{\text{кн}}),$$

де  $P_{\text{кн}}$  – рівень вихідної потужності одного каналу в точці MPI-S;

$N_{\text{ЕКД}}$  – кількість підсилювальних ділянок (ЕКД);

$h$  – постійна Планка;

$f$  – частота, яка відповідає оптичному каналу, що розраховується;

$\Delta f_{\text{кн}}$  – оптична смуга каналу;

$NF = 6$  дБ – шум-фактор підсилювача;

$A_{\text{ЕКД}}$  – сумарне загасання на підсилювальній ділянці (ЕКД).



Величина  $\Delta f_{\text{кн}}$  вибирається так, щоб для заданої швидкості передавання не відбувалося викривлень внаслідок накладення оптичних спектрів сусідніх каналів або внаслідок обмеження спектра модульованого оптичного сигналу. При частотному плані з кроком 100 ГГц, відповідно до рекомендації, канал з довжиною хвилі 1550 нм повинен характеризуватися смугою 0,1 нм, що відповідає смузі  $\Delta f_{\text{кн}} \approx 12,5$  ГГц. У цьому випадку:

$$10\lg(h \cdot f \cdot \Delta f_{\text{кн}}) = 10\lg(6,628 \cdot 10^{-34} \cdot 193,1 \cdot 12,5 \cdot 10^9 \cdot 10^3) \approx -58 \text{ (дБ)}.$$

Потужність оптичного каналу:  $P_{\text{кн}} = 0,5 \cdot 9 = 4,5$  (дБм).

Підставимо значення у формулу для OSNR та отримаємо співвідношення сигнал/шум для проектованої ділянки, яка має значення  $A_{\text{ЕКД}} = 282,5/15 = 18,83$  (дБ):

$$\text{OSNR}_{\text{A} \rightarrow \text{B}} = 0 - 18,83 - 6 - 12,04 + 58 = 21,12 \text{ (дБ)}.$$

Співвідношення оптичний сигнал/шум в кожному оптичному каналі в точках MPI-S і MPI-R для різних кодів застосування залежно від максимальної кількості ЕКД ( $x$ ) повинне бути не менше, дБ:

в точці MPI-S:

$$\text{MPI-S} = 19 + x + 10\lg x.$$

Підставивши значення в даний вираз, отримаємо:

$$\text{MPI-S}_{\text{A} \rightarrow \text{B}} = 19 + 18,83 + 10\lg 18,83 = 50,58 \text{ (дБ)};$$

в точці MPI-R:

$$\text{MPI-R} = 19 + x - k + 10\lg \frac{x}{k+1}.$$

Підставивши значення у вираз, отримаємо:

$$\text{При } k = 15; \text{ MPI-R}_{\text{A} \rightarrow \text{B}} = 19 + 18,83 - 15 + 10\lg \frac{18,83}{15+1} = 23,54 \text{ (дБ)}.$$

Якість сигналу відповідає нормам. Застосування корекції помилок, для якої застосовуються коди, що виправляють помилки, не потрібно.

Багатохвилові інтерфейси виконуються у вигляді модульних карт передавання/прийому на визначених довжинах хвиль, які визначені в рекомен-

даціях: G.692, G.694.1, G.694.2. Ці оптичні модулі в складі обладнання STM-N отримали назву «кольорових інтерфейсів» (рис. 3.13).

Потрібно відмітити, що оптичні мультиплексори (OMX) та демультимплексори (ODMX) технології xWDM мають схожу будову та вносять втрати потужності до 3 – 5 дБ в кожний оптичний канал і тому до їх складу часто входять ОП (рис. 3.14).

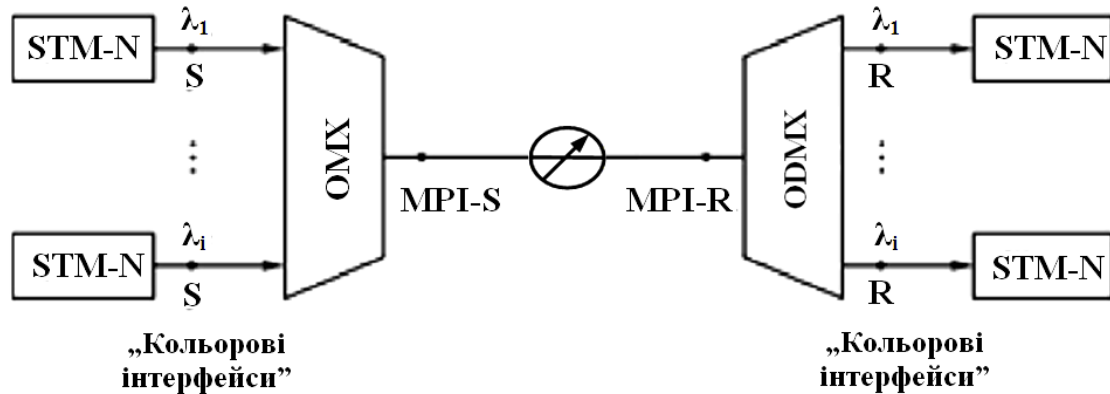


Рисунок 3.13 – Приклад використання «кольорових інтерфейсів» в обладнанні STM-N

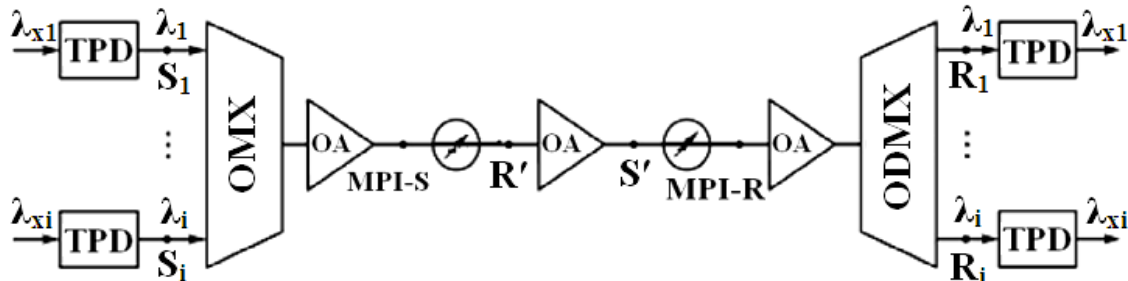


Рисунок 3.14 – Структурна схема ОТС з транспондерними модулями

Багатохвильові оптичні інтерфейси обладнання технології xWDM виконуються у вигляді транспондерних карт, в яких можлива реалізація багатьох функцій оброблення сигналів користувачів та лінійних сигналів, а саме:

- мультиплексування низькошвидкісних цифрових потоків в потоки високої швидкості ( $4 \times 622$  Мбіт/с в 2,5 Гбіт/с);
- виправлення помилок передавання в ВОЛТ (функція FEC);
- автоматичне регулювання потужності оптичного сигналу в кожному каналі;
- перетворення даних користувача в цикли ОПІ-ОТМ;
- реалізація функції регенерування типів 2R та 3R.

### 3.6 Будова та використання волоконно-оптичних передавачів

Оптичний передавач забезпечує перетворення вхідного електричного сигналу в вихідний оптичний сигнал за допомогою інфрачервоних світлодіодів (LED) або лазерних діодів (LD), які мають високу швидкість для передавання інформаційного потоку з швидкістю в тисячі Мбіт/с. Оптичні передавачі для широкосмугових аналогових оптичних систем повинні характеризуватись високою лінійністю.

В сучасних передавачах ВОСП-СР джерелами оптичного випромінювання є напівпровідникові лазери, які повинні працювати в одномодовому одночастотному режимі, що забезпечує мінімальну ширину спектра випромінювання та послаблює вплив хроматичної дисперсії.

Найбільш широкого використання в обладнанні ВОСП-СР знайшли такі типи джерела випромінювання:

- лазери з розподіленим зворотнім зв'язком (DFB);
- лазери з розподіленими брегівськими відбивачами (DBR);
- лазери з вертикальними резонаторами (VCSEL).

За допомогою селективного зворотного зв'язку, який забезпечено за рахунок періодичної решітки, в DFB-лазерах забезпечується підсилення випромінювання тільки на одній робочій моді лазера, і таким чином, вся потужність сигналу концентрується в дуже вузькій ділянці спектра.

Перевагами DFB-лазерів є:

- значення ширини смуги випромінювання, яка на половині висоти сигналу є меншою 100 МГц;
- рівень бокових мод, які подавляються до рівня понад 40 дБ;
- геометрія світловоду, яка забезпечує високу направленість та високу ступінь поляризації вихідного лазерного випромінювання;
- висока ефективність DFB-лазерів (вихідна потужність в 1 мВт забезпечується при струмі накачування в 40 мА);
- конструктивне виконання DFB-лазера, що дозволяє створювати інтегральні оптичні пристрої.

Недоліками DFB-лазерів є:

- температурна залежність зміни довжини хвилі випромінювання;
- чутливість до зворотного відбитого сигналу в ВОЛТ.

Температурна стабільність типового DFB-лазера знаходиться в межах  $0,08-1,12 \text{ нм}/^\circ\text{C}$  та призводить до зміни згенерованої довжини хвилі в межах 6–8 нм в діапазоні температур 0–70 °С. Тому, за допомогою термоелектричних мікроохолоджувачів виконують термостабілізацію DFB-лазерів з точністю до 2 °С.

Чутливість DFB-лазерів до відбитих сигналів у ВОЛТ через дуже вузьку їх смугу випромінювання впливає на стабільність роботи лазера. Для зменшення чутливості DFB-лазерів до відбитих сигналів до складу передавача вводиться оптичний ізолятор.

Лазери з розподіленими брегівськими відбивачами (DBR-лазери) будуються на основі періодичних решіток показника переломлення – брегівські відбивачі, робочий спектр яких визначається кількістю інтерферувальних відбитих пучків, які дорівнюють кількості штрихів решітки, що створені на активній частині кристалу лазера. Зі збільшенням кількості інтерферувальних пучків ширина спектра відбитого сигналу зменшується. Тому збільшенням кількості штрихів можна забезпечити умови генерації лише для одної моди, що відповідає режиму одночастотної одномодової генерації, при якому ширина спектра випромінювання становить приблизно 1 МГц.

В лазерах з вертикальним резонатором (VCSE-лазери) випромінювання спрямоване перпендикулярно від площини розподілених брегівських відбивачів, якими є шари напівпровідників з періодично змінним значенням показника переломлення, що виконують функції лазерних дзеркал. Переміщенням верхнього рухомого дзеркала можна змінювати довжину хвилі випромінювання в межах сотень нм, що охоплює діапазони C та L.

Використання перестроюваних лазерів значно розширює можливості гнучкої зміни роботи реконфігурованих OTM за рахунок того, що кожний такий передавач може замінити від 8 до 100 резервних передавачів в DWDM-системах.

Оптичні передавачі з амплітудною модуляцією поділяються на два типи: передавачі з прямою модуляцією та передавачі з зовнішньою модуляцією.

Оптичні передавачі з прямою модуляцією інтенсивності оптичної носійної, в основному, використовуються в ОТС з швидкістю до 2,5 Гбіт/с. В цих передавачах відповідно до інформаційної послідовності модулюється струм накачки лазера, під дією якого модулюється вихідна потужність (інтенсивність) оптичного випромінювання лазера.

Основним недоліком цих передавачів є наявність паразитної частотної модуляції, яка виникає в процесі модуляції струму накачування лазера, що призводить до розширення спектра випромінювання та збільшення спотворень, пов'язаних з хроматичною дисперсією.

Сучасні передавачі з прямою модуляцією можуть забезпечити передавання інформаційного потоку з швидкістю до 10 Гбіт/с.

Передавачі із зовнішньою амплітудною модуляцією дозволяють суттєво покращити технічні параметри ОТС та можуть забезпечити передавання інформаційного потоку з швидкістю понад 10 Гбіт/с.

В таких передавачах за допомогою зовнішнього модулятора модулюється неперервне оптичне випромінювання з вузькосмугового одномодового напівпровідникового лазера, що забезпечує формування оптичного сигналу з мінімальною шириною спектра.

В основному, в ОТС з спектральним розподілом каналів використовуються зовнішні модулятори на основі Маха-Цендера або електроабсорбційні модулятори (EA).

Модулятор Маха-Цендера (M-Z) є інтерферометром, який використовує хвилеводи на основі монокристалів ніобіту літію LiNbO<sub>3</sub> або фосфіду

індію InP. Коефіцієнт заломлення такого матеріалу може змінюватись під дією зовнішньої напруги. Узагальнену схему модулятора Маха-Цендера показано на рисунку 3.15. За відсутності зовнішньої напруги оптичне електромагнітне поле в обох плечах M-Z-модулятора (на виході модулятора) має однаковий зсув фаз і тому інтенсивність оптичного сигналу на виході модулятора буде максимальною.

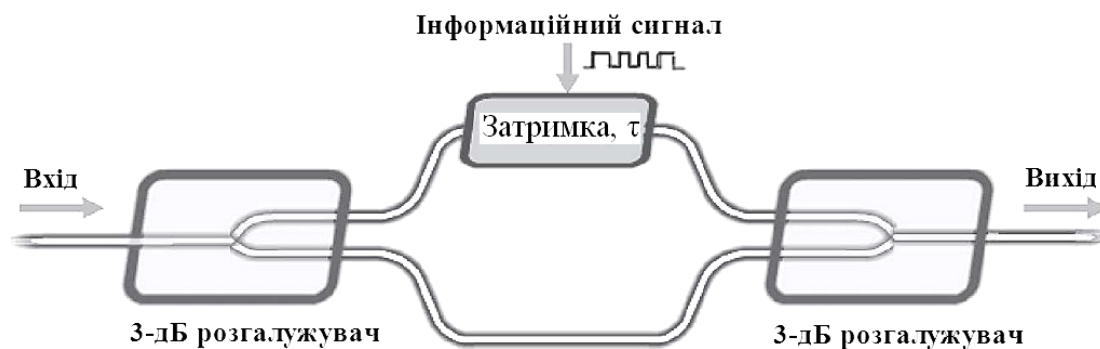


Рисунок 3.15 – Узагальнена схема модулятора Маха-Цендера

При подаванні зовнішньої напруги за рахунок зміни коефіцієнта заломлення в одному з плеч з'являється додатковий фазовий зсув, який порушує синфазність інтерференційної картини та зменшує потужність сигналу на виході модулятора і в результаті чого створюється оптична копія цифрового сигналу на виході модулятора.

Основними параметрами M-Z-модуляторів є:

- коефіцієнт послаблення сигналу, який визначається як співвідношення значень сигналу на виході модулятора при включеному та виключеному стані (13 дБ);
- значення максимальної швидкості модулювального потоку, яка дорівнює 75 Гбіт/с.

Передавальні оптичні модулі виконують перетворення електричних сигналів в оптичні для подальшого їх введення в ОВ з мінімальними втратами.

Основним елементом передавальних оптичних модулів є джерело випромінювання з такими параметрами:

- робоча довжина хвилі повинна попадати в діапазони ВП;
- джерело випромінювання повинне мати необхідну швидкодію для забезпечення роботи ОТС в усьому діапазоні робочих частот;
- забезпечення мінімальних втрат потужності оптичних сигналів;
- значення вихідної потужності джерела випромінювання повинно забезпечувати передавання інформаційного потоку на необхідну відстань та не призводити до появи нелінійних ефектів чи пошкодження ОВ або оптичного приймача;
- режим роботи джерела випромінювання повинен забезпечуватись заданим температурним діапазоном;
- джерело випромінювання має бути не дорогим.

Основними перевагами DWDM-систем з двопозиційною амплітудною модуляцією є простота їх реалізації та низька вартість прийомопередавального обладнання.

Недоліками DWDM-систем з двопозиційною амплітудною модуляцією є:

- низька спектральна ефективність, яка є мірою ефективності використання робочого діапазону DWDM-системи та визначається як співвідношення пропускну здатності оптичного каналу до міжканального інтервалу згідно з формулою  $\gamma = V_{\text{інф.макс}} / \Delta\nu$ ;
- висока чутливість інформаційних сигналів до спотворень через дисперсію та нелінійність.

Пропускною здатністю каналу є максимальна кількість інформації, яка передається через канал за одиницю часу, тобто максимальна швидкість передавання інформації в каналі:

$$V_{\text{інф.макс}} = I_{\text{макс}} \cdot V_{\text{лін}}$$

де  $I_{\text{макс}} = \log 2m$  – інформаційна ємність сигналу;

$m$  – кількість можливих станів сигналу;

$V_{\text{лін}}$  – швидкість передавання символів.

Тому, для підвищення спектральної ефективності системи при фіксованому значенні міжканального інтервалу необхідно збільшувати пропускну здатність каналу за рахунок збільшення швидкості передавання символів.

Враховуючи, що максимальна швидкість передавання в ОТС обмежується фізичними факторами та становить приблизно 50 Гбод, спектральна ефективність DWDM-систем з двопозиційною амплітудною модуляцією не перевищує 0,5 біт/с/Гц.

Потрібно відмітити, що збільшення швидкості передавання інформації в ОТС з амплітудною модуляцією супроводжується ростом спотворень цифрових сигналів у ВОЛЗ, а саме:

- спотворень, які спричинені хроматичною дисперсією, що прямопропорційні квадрату каналної швидкості передавання інформації;
- спотворень, які спричинені поляризаційною модовою дисперсією та потужністю шумів.

Внаслідок цих спотворень цифрових сигналів зменшується довжина регенераційної ділянки (без компенсації дисперсії). Тому, при швидкості передавання інформації в 40 Гбіт/с та максимально допустимому значенні повної дисперсії в ВОЛЗ 60 пс/нм максимальна довжина регенераційної ділянки становить менше 10 км.

Потрібно відмітити, що у високошвидкісних ВОСП-СР використовуються багатопозиційні формати модуляції з інформаційною ємністю сигналів понад 2 біт/символ.

Для збільшення пропускну здатності оптичних каналів у DWDM-системах до 100 Гбіт/с використовуються диференціальна квадратурна модуляція та когерентно-поляризаційне мультиплексування (СР-DQPSK).

На рисунку 3.16 показано узагальнену структурну схему передавача з CP-DQPSK-модуляцією.

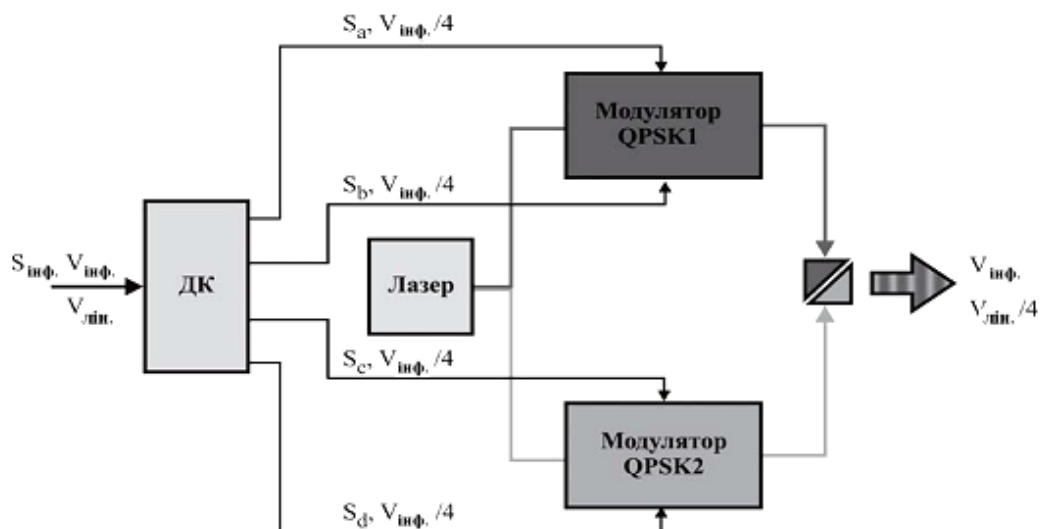


Рисунок 3.16 – Структура схема передавача з CP-DQPSK-модуляцією

До складу цього передавача входять: диференційний кодер (ДК), в якому інформаційний сигнал поділяється на чотири цифрових потоки з швидкістю  $V_{\text{инф}}/4$ ; лазер – джерело оптичного випромінювання; два квадратурних фазових модулятори (QPSK1 та QPSK2); поляризаційний мультиплексор. Квадратурний фазовий модулятор QPSK призначено для формування фазомодульованого сигналу  $y(t) = A \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$  з суми квадратурних складових  $y(t) = [A \cos \varphi(t)] \cos \omega_0 t - [A \sin \varphi(t)] \sin \omega_0 t$ .

На рисунку 3.17 показано структуру квадратурного фазового модулятора QPSK.

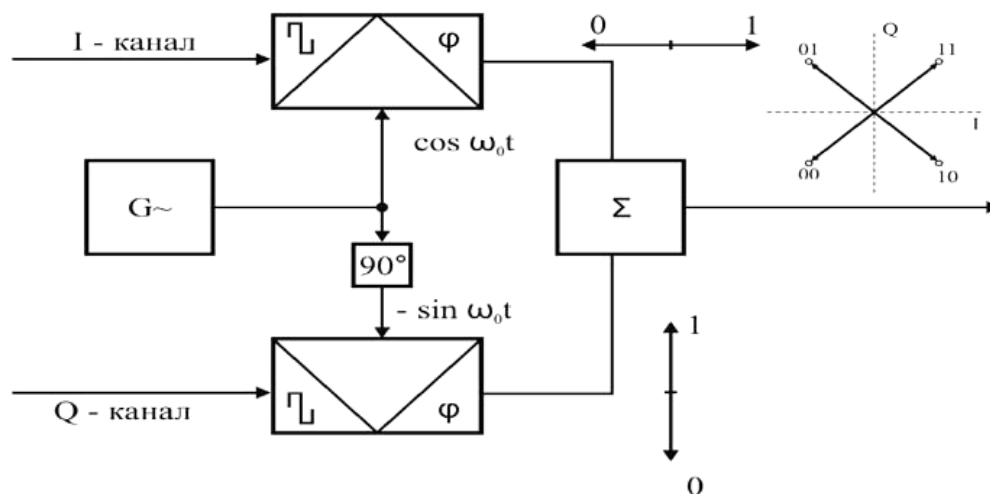


Рисунок 3.17 – Структура квадратурного фазового модулятора QPSK

Функції  $I(t) = A \cos \varphi(t)$  та  $Q(t) = A \sin \varphi(t)$  модулюють квадратурні носійні  $\cos \omega_0 t$  та  $\sin \omega_0 t$  в результаті чого на виході фазових модуляторів формуються сигнали 2-ФМ квадратурних каналів, після чого додаються та утворюють чотирипозиційний сигнал 4-ФМ.

Для підвищення спектральної ефективності ОТС крім багатопозиційних сигналів додатково використовується поляризаційне мультиплексування. В такому випадку на виході модулятора QPSK1 формується оптичний чотирипозиційний сигнал з диференційною квадратурною фазовою модуляцією та горизонтальною поляризацією, а на виході модулятора QPSK2 формується оптичний сигнал з вертикальною поляризацією.

Поляризаційний мультиплексор об'єднує два сигнали QPSK1 та QPSK2 з взаємно-ортогональною поляризацією, в результаті на виході лінійного передавача формується сигнал з швидкістю інформаційного потоку  $V_{\text{інф}}$  та цифровою швидкістю передавання  $V_{\text{лін}}/4$ .

У ВОСП-СР для відновлення когерентного опорного тактового сигналу використовується диференційне когерентне детектування, яке, в свою чергу, потребує попереднього диференційного кодування послідовності символів у передавачі, тобто використання диференційної квадратурної фазової модуляції (DQPSK), при якій інформація кодується різницею фаз між двома послідовними символами.

Оптичним модулятором є активний компонент ВОСП, що виконує модуляцію оптичного носійного сигналу по одному або декількох параметрах, а саме: потужністю (інтенсивністю), частотою (довжиною хвилі), фазою та площиною поляризації. Тому відповідно до типу модульовального параметра модулятори можуть бути: фазовими, амплітудними, частотними та поляризаційними.

### 3.7 Будова оптичних приймачів та особливості їх використання

Оптичний приймач забезпечує зворотне перетворення оптичних сигналів в електричні. Як основний елемент в оптичних приймачах використовуються р-і-n-фотодіоди з малою інерційністю та необхідною чутливістю, що підтримується в досить широкому діапазоні довжин хвиль (у всіх ВП (3 – 5)).

На виході фотодетектора крім електричної потужності інформаційного сигналу присутні шумові компоненти, що викликані спільним впливом оптичного сигналу та підсиленої спонтанної емісії (ASE) оптичного підсилувача:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{др.ш.с}} + P_{\text{др.ш.ASE}} + P_{\text{ш.с.ASE}} + P_{\text{ш.вб.ASE}}$$



де  $P_{др.ш.с}$  – потужність дробового шуму, викликаного оптичним сигналом;

$P_{др.ш.ASE}$  – потужність дробового шуму, що спричинений випромінюванням ASE;

$P_{ш.с.ASE}$  – потужність шуму викликаного биттям між компонентами оптичного сигналу та ASE в смузі оптичного (спектрального) каналу;

$P_{ш.вб.ASE}$  – потужність шуму, що викликаний паразитними перевідбиттями оптичного сигналу та ASE.

Наявність цих шумових компонент потребує визначення значення мінімально допустимої потужності вхідного сигналу фотодетектора для заданого коефіцієнта помилки та коду цифрового сигналу, за допомогою якого можна визначити чутливість ОТС.

**Приклад.** Необхідно визначити максимальне значення завадостійкості сигналу на виході трансімпедансного підсилювача при вхідному рівні середньої оптичної потужності -35 дБм, тактовій частоті сигналу 622 МГц, робочій довжині хвилі 1,55 мкм та квантовій ефективності 80%. Попередній підсилювач є малOSHумним при кімнатній температурі, а ЛФД – виготовлений на основі фосфіду індію.

**Крок 1.** Визначимо максимально допустиме значення резистора зворотного зв'язку трансімпедансного підсилювача фотоприймача ОТС (за відсутності корекції АЧХ) за формулою:

$$R_{зв.зв} = \frac{1}{2\pi f_T C_{зв.зв}}.$$

Прийнявши, що  $C_{зв.зв} = 0,1 \dots 0,2$  пФ, отримаємо:

$$R_{зв.зв} = \frac{1}{2\pi f_T C_{зв.зв}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 622 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-12}} = 2,5 \text{ (кОм)}.$$

**Крок 2.** Визначимо монохроматичну чутливість за струмом:

$$S_i = \frac{\lambda \cdot \eta}{1,24} = \frac{1,55 \cdot 0,8}{1,24} = 1,0 \left( \frac{\text{А}}{\text{Вт}} \right).$$

**Крок 3.** Визначимо середню оптичну потужність на вході фотодетектора згідно з виразом:

$$P_{вх} = 1 \text{ (мВт)} \cdot \text{dec}(0,1 \cdot p_{вх}) = 10^{-3,5} \text{ (мВт)} = 3,16 \cdot 10^{-7} \text{ (Вт)}$$

та середнє значення фотоструму:

$$I_{\phi} = S_i \cdot P_{\text{вх}} = 1,316 \cdot 10^{-7} \text{ (А)}.$$

**Крок 4.** Визначимо оптимальний коефіцієнт лавинного множення за формулою:

$$M_0 = \left( \frac{4kTF_y}{R_{\text{зв.зв}} \cdot q \cdot \eta \cdot I_{\phi}} \right)^{\frac{1}{2+\eta}} = \left( \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2,5 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,8 \cdot 3,16 \cdot 10^{-7}} \right)^{\frac{1}{2+0,8}} = 6.$$

**Крок 5.** Визначимо значення співвідношення сигнал/шум для ЛФД згідно з виразом:

$$Q_{\text{ЛФД}} = \frac{I_{\phi} \cdot M_0}{\sqrt{\left( 2q \cdot I_{\phi} \cdot M_0^{2+\eta} + \frac{4kTF_y}{R_{\text{зв.зв}}} \right) \cdot 0,7f_T}} =$$

$$= \frac{3,16 \cdot 10^{-7} \cdot 6}{\sqrt{\left( 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,16 \cdot 10^{-7} \cdot 6^{2+0,8} + \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2,5 \cdot 10^3} \right) \cdot 0,7 \cdot 622 \cdot 10^6}} = 19,5.$$

Звідси, заводозахищеність сигналу при використанні ЛФД дорівнює:

$$A_{\text{з.ЛФД}} = 20 \lg Q_{\text{ЛФД}} = 20 \lg 19,5 = 25,8 \text{ (дБ)}.$$

**Крок 6.** Визначимо значення співвідношення сигнал/шум для р-і-п ФД, для якого  $M_0 = 1$ :

$$Q_{\text{pin}} = \frac{I_{\phi} \cdot M_0}{\sqrt{\left( 2q \cdot I_{\phi} \cdot M_0^{2+\eta} + \frac{4kTF_y}{R_{\text{зв.зв}}} \right) \cdot 0,7f_T}} =$$

$$= \frac{3,16 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{\sqrt{\left( 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,16 \cdot 10^{-7} \cdot 1^{2+0,8} + \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2,5 \cdot 10^3} \right) \cdot 0,7 \cdot 622 \cdot 10^6}} = 5,91.$$

**Крок 7.** Звідси, заводозахищеність сигналу при використанні р-і-п ФД дорівнює:

$$A_{\text{з.р.п.н}} = 20 \lg Q_{\text{pin}} = 20 \lg 5,91 = 15,4 \text{ (дБ)}.$$

**Крок 8.** Враховуючи, що при слабких вхідних сигналах дробовий шум є незначним і тому при використанні р-і-п ФД значення відношення сигнал/шум можна знайти за такою формулою:

$$Q_{\text{pin.1}} = \sqrt{\frac{I_{\phi}^2 \cdot R_{\text{зв.зв}}}{4kTF_y \cdot 0,7f_T}} = \sqrt{\frac{(3,16 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 2,5 \cdot 10^3}{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 0,7 \cdot 622 \cdot 10^6}} = 5,95.$$

Отже, перевага від використання ЛФД в даному випадку становить приблизно 10 дБ, а результати розрахунків за точною та наближеною формулами практично збігаються.

Оптичний приймач з прямим детектуванням забезпечує перетворення вхідного амплітудно-модульованого оптичного сигналу в електричний сигнал та здійснює його регенерування. На рисунку 3.18 відображено узагальнену структурну схему оптичного приймача.

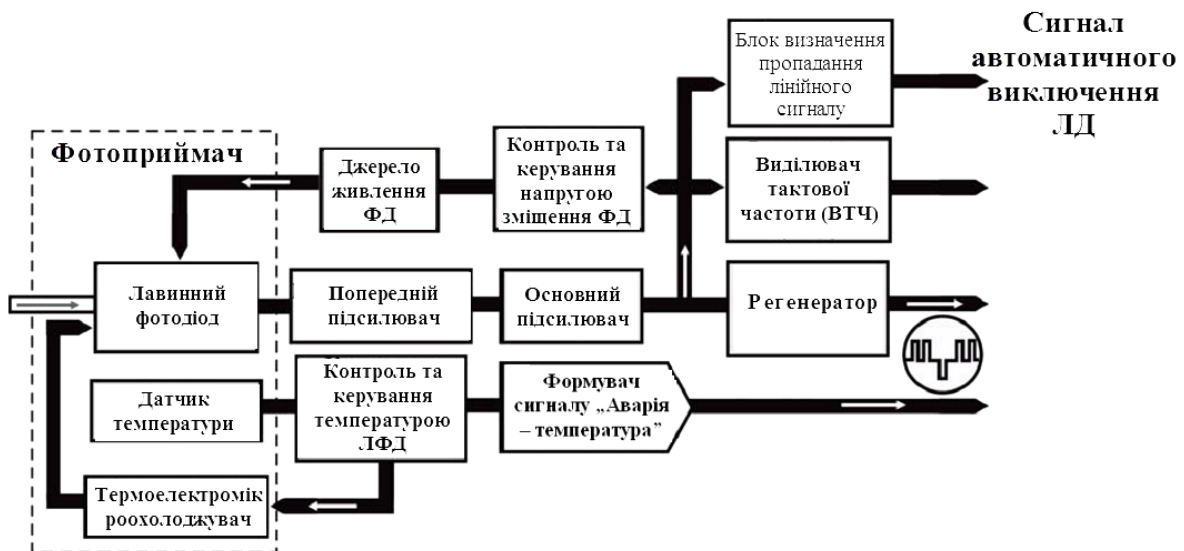


Рисунок 3.18 – Узагальнена структурна схема оптичного приймача

До основних компонентів оптичного приймача належать:

- фотоприймач, що перетворює вхідний оптичний сигнал в електричний;
- попередній та основний підсилювачі електричних сигналів для підсилення та корегування сигналу;
- виділювач тактової частоти, який забезпечує виділення з спектра вхідного сигналу складової тактової частоти та формування відновленого сигналу тактової частоти;
- регенератор, який відновлює початкову форму та часові співвідношення імпульсів цифрового сигналу.

У ВОСП-СР використовуються два типи оптичних приймачів: тип А та тип Р.

В приймачі типу Р фотоприймач виконано на основі PIN-фотодіода, який характеризується наявністю між дуже легованими  $p^+$  та  $n^+$  шарами слаболегованого напівпровідника  $n$ -типу, так званого і-шару.

Перевагами цих фотоприймачів є низьке значення робочої напруги для PIN-фотодіода, проста схема та низька вартість фотоприймача.

Основним недоліком цих приймачів є їх низька чутливість.

В приймачах типу А фотоприймач виконується на основі лавинного фотодіода (ЛФД), принцип дії якого базується на лавинному електронному множенні первинного фотоструму. Для кремнієвих ЛФД значення коефіцієнта підсилення може дорівнювати 20 дБ, а для германієвих та InGaAs-фотодіодів – 10 – 15 дБ.

Основною перевагою приймачів типу А є їх вища чутливість на 5–7 дБ порівняно з приймачами типу Р за рахунок ефекту лавинного підсилення. Недоліками приймачів типу А є високе значення робочої напруги порівняно з PIN-фотодіодами та підвищена чутливість коефіцієнта множення до змін напруги та температури.

Ці приймачі, в основному, використовуються на регенераційних ділянках великої довжини, де виправдана їх висока вартість та більш складні схеми реєстрації оптичних сигналів.

Потрібно відмітити, що за рахунок підвищення чутливості при використанні фотоприймача з лавинним фотодіодом можна не використовувати попередній підсилювач, який є необхідним в інших випадках.

Порогом чутливості є мінімальне абсолютне значення середньої потужності цифрового оптичного сигналу  $p_{\text{пор}}$  на вході фотоприймача, при якому забезпечується задана ймовірність помилки регенерування  $p_{\text{пом}}$ .

**Приклад.** Необхідно визначити поріг чутливості фотоприймача при входному рівні середньої оптичної потужності -35 дБм, тактовій частоті сигналу 622 МГц, робочій довжині хвилі 1,55 мкм та квантовій ефективності 80 %. Попередній підсилювач є малошумним при кімнатній температурі, а ЛФД – виготовлений на основі фосфіду індію. Допустима ймовірність помилки регенерування дорівнює  $10^{-10}$ .

**Крок 1.** Визначимо значення необхідного співвідношення сигнал/шум за формулою:

$$20 \lg Q_{\text{необ.}} = 4,63 + 11,42 \lg \left( \lg \frac{1}{p_{\text{пом}}} \right) + \Delta A_3,$$

де  $\Delta A_3 = 2...3$  дБ – запас захищеності, що враховує наявність погіршуючих факторів.

Отже, необхідне значення співвідношення сигнал/шум дорівнює:

$$20 \lg Q_{\text{необ.}} = 4,63 + 11,42 \lg 10^{10} + 2 = 18 \text{ дБ,}$$

звідси

$$Q_{\text{необ.}} = 10^{0,9} = 8.$$

**Крок 2.** Визначимо значення порогу потужності згідно з виразом:

$$P_{\text{пор}} = \frac{1}{S_i} \left[ \frac{Q_{\text{необ}}^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{\eta}\right) \cdot 0,7f_T}{\left(\frac{4kTF_y}{R_{\text{зв.зв}}}\right)^{-\frac{\eta}{\eta+2}} \cdot (q \cdot \eta)^{-\frac{2}{2(\eta+2)}}} \right]^{\frac{\eta+2}{2(\eta+1)}} =$$

$$= \frac{1}{1} \left[ \frac{8^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{0,8}\right) \cdot 0,7 \cdot 622 \cdot 10^6}{\left(\frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2,5 \cdot 10^3}\right)^{-\frac{0,8}{0,8+2}} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,8)^{-\frac{2}{2(0,8+2)}}} \right]^{\frac{\eta+2}{2(\eta+1)}} = 7,91 \cdot 10^{-8} \text{ (Вт)},$$

звідси значення порогу чутливості дорівнює:

$$p_{\text{пор}} = 10 \lg P_{\text{пор}} = 10 \lg 7,91 \cdot 10^{-5} = -41 \text{ (дБм)}.$$

**Крок 3.** Виконаємо перевірку проведених розрахунків. Визначимо значення оптимального коефіцієнта лавинного множення  $M_0$  за формулою:

$$M_0 = \left( \frac{4kTF_y}{R_{\text{зв.зв}} \cdot q \cdot \eta \cdot I_{\phi}} \right)^{\frac{1}{2+\eta}} = \left( \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2,5 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,8 \cdot 7,91 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{2+0,8}} = 10.$$

**Крок 4.** Визначимо значення співвідношення сигнал/шум для ЛФД згідно з виразом:

$$Q_{\text{ЛФД}} = \frac{I_{\phi} \cdot M_0}{\sqrt{\left(2q \cdot I_{\phi} \cdot M_0^{2+\eta} + \frac{4kTF_y}{R_{\text{зв.зв}}}\right) \cdot 0,7f_T}} =$$

$$= \frac{7,91 \cdot 10^{-8} \cdot 10}{\sqrt{\left(2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 7,91 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{2+0,8} + \frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2,5 \cdot 10^3}\right) \cdot 0,7 \cdot 622 \cdot 10^6}} = 8.$$

Перевірка підтверджує правильність проведених розрахунків.

Когерентні оптичні приймачі лінійно перетворюють амплітудні та фазомодульовані інформаційні оптичні потоки в електричні сигнали та здійснюють регенерування імпульсів цифрового сигналу.

На рисунку 3.19 показано структурну схему когерентного приймача CP-DQPSK.

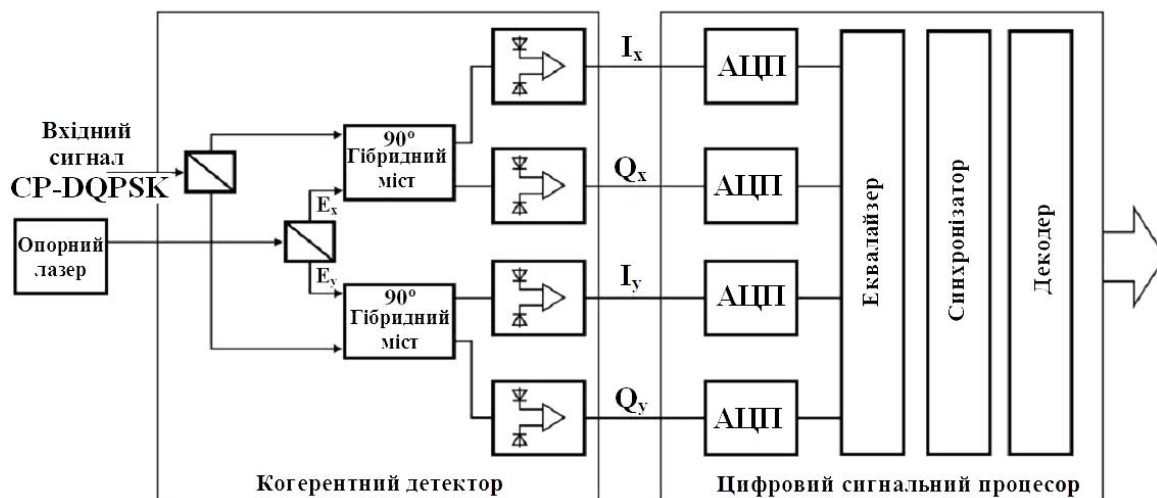


Рисунок 3.19 – Структурна схема когерентного приймача CP-DQPSK

Цей приймач складається з таких компонентів: опорний лазер, який виконує функції генератора опорного сигналу та є джерелом оптичного сигналу в передавачі; когерентний оптичний детектор, який лінійно переносить інформацію про комплексну обвідну оптичного сигналу в передавачі; цифровий сигнальний процесор, який вирівнює поляризацію та фазу інформаційного та опорного сигналів.

Потрібно відмітити, що цифрове оброблення вихідних сигналів дозволяє здійснити електронну компенсацію лінійних спотворень, що спричинені хроматичною та поляризаційною дисперсіями.

Приймальні оптичні модулі забезпечують перетворення прийнятого з ОВ оптичного сигналу в електричну форму для подальшого його оброблення електронними пристроями.

Основними функціональними компонентами приймальних оптичних модулів є фотоприймач, який перетворює вхідний оптичний сигнал в електричну форму, електричний підсилювач для підсилення сигналу до необхідного значення та регенератор, для відновлення початкової форми сигналу.

Отже, використання формату модуляції CP-DQPSK та когерентного прийому забезпечує: підвищення пропускну здатності оптичних каналів; збільшення спектральної ефективності системи передавання; високу стійкість до впливу хроматичної та поляризаційної дисперсій; можливість роботи системи при низьких значеннях оптичного співвідношення сигнал/шум.

### 3.8 Будова та використання пасивних оптичних компонентів

Волоконно-оптичні лінії затримки призначені для затримки оптичного сигналу на заданий час та використовуються як елемент затримки в активних волоконно-оптичних лініях затримки для побудови часових оптичних мультиплексорів та демультимплексорів. Волоконно-оптичні лінії затримки класифікують за кількістю оптичних полюсів та конфігурацією: однополюсні та багатопольюсні.

Багатопольюсна волоконно-оптична лінія затримки з діапазоном часових затримок у вигляді ряду арифметичної прогресії називається «регулярною волоконно-оптичною лінією затримки».

Характерною особливістю волоконно-оптичних ліній затримки є їх висока температурна стабільність часу затримки, яка дорівнює  $6,8 \cdot 10^{-4}$  на  $1^\circ\text{C}$ .

Основними робочими параметрами волоконно-оптичних ліній затримки є:

- час затримки оптичного сигналу;
- внесені втрати оптичної потужності;
- діапазон робочих довжин хвиль;
- кількість оптичних полюсів;
- крок зміни часу затримки оптичного сигналу (характерно для багатопольюсних регулярних волоконно-оптичних ліній затримки).

Активні ВОЛЗ призначені для затримки електричних сигналів на заданий час шляхом перетворення електричних сигналів в оптичні сигнали, наступної затримки цих сигналів у волоконно-оптичній лінії затримки та перетворенням їх в електричні сигнали.

Залежно від типу інформаційного сигналу активні ВОЛЗ можуть бути: аналоговими та цифровими, а також одноканальними (односмуговими) та багатоканальними (багатосмуговими) для затримки декількох сигналів.

Пасивні оптичні компоненти складаються з оптичних з'єднувачів, шнурів, розподільних панелей, кросових шаф, з'єднувальних муфт, оптичних розгалужувачів, атенюаторів, систем спектрального ущільнення (мультиплексорів, демультимплексорів). Одною з важливих задач в організації якісної роботи ОТС є забезпечення надійних з'єднань різних компонентів ВОЛТ: з'єднання оптоелектронних перетворювачів (приймачів та передавачів) з ОВ та з'єднання відрізків ОВ між собою та іншими волоконно-оптичними компонентами.

Отже, до пасивних дискретних оптичних компонентів належать:

- оптичні відгалужувачі та розгалужувачі;
- оптичні перемикачі та комутатори;
- оптичні ізолятори та циркулятори;
- поляризатори та коліматори;
- оптичні мультиплексори та демультимплексори;
- оптичні модулятори;

- оптичні з'єднувачі;
- адаптери та атенюатори.

Оптичним розгалужувачем є пасивний компонент ВОСП, який призначений розподіляти оптичні сигнали між оптичними полюсами ОТС (оптичні вилки та розетки).

Згідно з правилами розподілу оптичних сигналів оптичні розгалужувачі поділяються на типи:

- оптичні розгалужувачі з динамічним значенням відгалуженої потужності оптичного сигналу;
- оптичні циркулятори та розгалужувачі кільцевої структури, які здійснюють послідовне передавання сигналу між оптичними полюсами;
- оптичні демультимплексори, що розділяють агрегатний оптичний сигнал на компонентні сигнали;
- оптичні розгалужувачі, що працюють на одній довжині хвилі оптичного випромінювання;
- розгалужувачі з різною конфігурацією оптичних полюсів,  $N \times M$ , де  $N$  – кількість вхідних оптичних полюсів;  $M$  – кількість вихідних оптичних полюсів.

Оптичні демультимплексори поділяються на типи: спектральні – з спектральним розділенням оптичних сигналів; часові – з часовим розділенням оптичних сигналів.

Волоконно-оптичні відгалужувачі та розгалужувачі є основними компонентами пасивних оптичних мереж доступу. Відгалужувачі значною мірою використовуються в системах і пристроях контролю параметрів та керуванні обладнанням ОТС, а також в оптичних вимірювальних приладах (оптичних рефлектометрах). Направленні розгалужувачі поділяються на 2 типи: X-типу та Y-типу. На рисунку 3.20, а показано схему широко використовуваного направлено розгалужувача X-типу.

Оптичні розгалужувачі виготовляються з відрізків оптичних волокон та можуть забезпечувати поділ вхідної потужності на дві рівні частини або з коефіцієнтом відгалуження менше 10 % (для пристроїв контролю оптичної потужності).

Відгалужувач Y-типу значною мірою використовується як розділювач потужності на дві частини, тому його ще називають розгалужувачем і він є базовим компонентом в багатоканальних матричних розгалужувачах та інтерферометрах (рис. 3.20, б).

При включенні оптичного розгалужувача в інверсному режимі він зможе виконувати функцію об'єднувача оптичних сигналів. Оптичні об'єднувачі поділяються на оптичні об'єднувачі сигналів одної довжини хвилі, оптичні спектральні мультиплексори, оптичні часові мультиплексори та об'єднувачі з динамічною конфігурацією оптичних полюсів  $N \times M$ , де  $N$  – кількість вхідних оптичних полюсів;  $M$  – кількість вихідних оптичних полюсів.



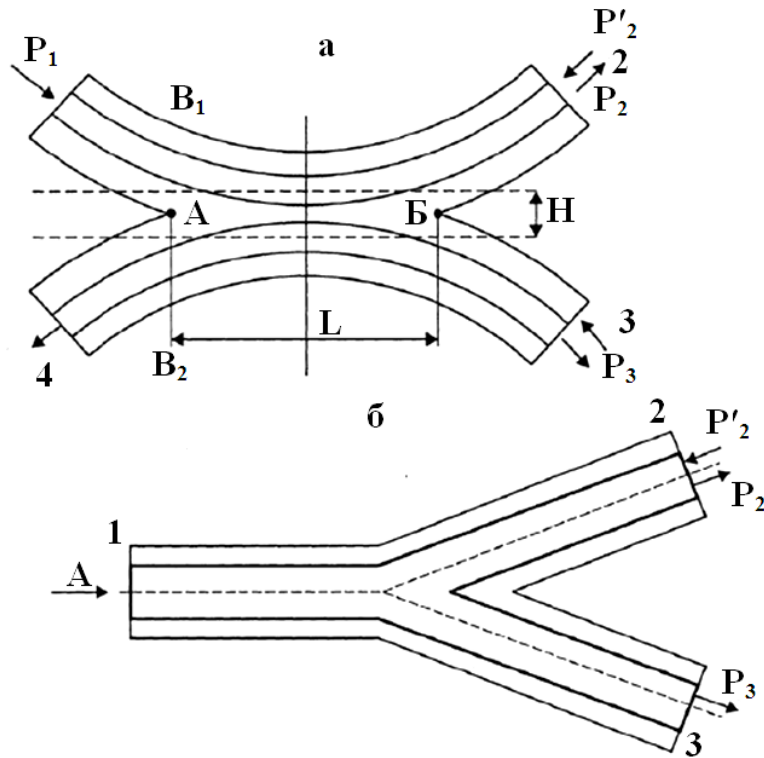


Рисунок 3.20 – Схеми направлених розгалужувачів:  
а) Х-типу; б) Y-типу

Основними робочими параметрами оптичних розгалужувачів та об'єднувачів є:

- діапазон робочих хвиль;
- внесені втрати оптичної потужності;
- оптичні надлишкові втрати;
- коефіцієнт передавання між оптичними полюсами;
- перехідне затухання між оптичними полюсами;
- нерівномірність коефіцієнта передавання між оптичними полюсами;
- динамічний діапазон частот оптичних сигналів на вхідних оптичних полюсах оптичного спектрального мультиплектора;
- динамічний діапазон частот оптичних сигналів на вихідних оптичних полюсах оптичного спектрального демультиплектора;
- швидкість передавання вихідного та вхідного сигналу.

Оптичним з'єднувачем є пасивний компонент, який призначений для з'єднання оптичних полюсів оптичного обладнання ОТС. Полюси оптичних компонентів згідно з їх будовою поділяються на типи: вбудований торцевий зріз ОВ в оптичний наконечник, центратор оптичної розетки та вбудований торцевий зріз ОВ в оптичний кабель.

За конструктивним виконанням оптичні з'єднувачі поділяються на нероз'ємні та роз'ємні які, в свою чергу, поділяються на однополюсні та багатопольюсні.

Нероз'ємні оптичні з'єднувачі призначені для з'єднання ОВ, вбудованих в оптичні кабелі та використовуються в з'єднувальних муфтах магістральних, зонових та міських ОТС. Нероз'ємні з'єднувачі можуть бути зварними або механічними, які розміщуються в сплайс-пластинах та оптичних касетах.

Оптичні перемикачі призначені для комутації вхідного оптичного полюса з вихідними полюсами. Волоконно-оптичні перемикачі використовуються для виконання змін в архітектурі ОТМ та оперативної маршрутизації в мережах доступу і локальних системах ОТС шляхом швидкої та ефективної комутації оптичних інформаційних потоків.

Інтегральні активно-хвильоводні матриці будуються на основі інтегрування в єдину оптоелектронну інтегральну схему напівпровідникових оптичних підсилювачів та оптичних хвильоводних пристроїв у вигляді багатопарової монолітної інтегральної схеми, в якій об'єднано: оптичний хвильовод, напівпровідниковий оптичний підсилювач, лазер, оптичний модулятор, детектор, приймач та передавач. Така структура може виконувати функції як оптичного атенюатора так і оптичного провідника без втрат.

Оптичні крос-комутатори виконують крос-комутацію оптичних каналів між різними напрямками, тобто перенаправляють (маршрутизують) оптичні канали за новими напрямками і тому використовуються в найбільш завантажених вузлах (більше 3-х напрямків) ОТМ. Узагальнену структурну схему крос-комутатора оптичних каналів показано на рисунку 3.21.

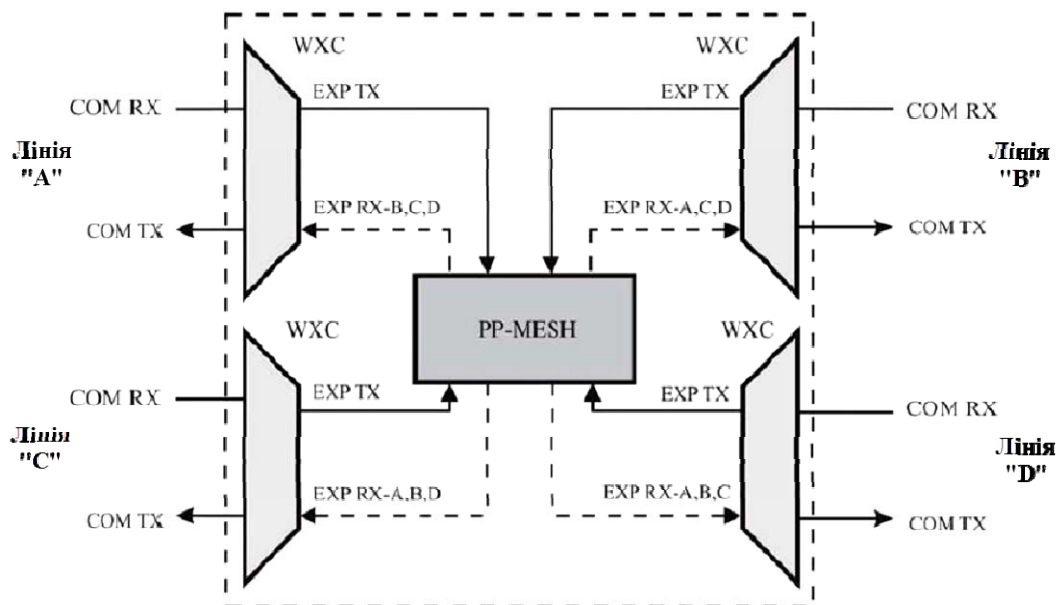


Рисунок 3.21 – Узагальнена структурна схема крос-комутатора оптичних каналів

Плата WXC є двонаправленим крос-комутатором оптичних каналів, який селективно передає будь-яку комбінацію сигналів оптичних каналів з

вхідних портів EXP RX в загальний порт COM TX.

Оптичними ізоляторами або вентилями називаються пристрої, які пропускають світло тільки в одному напрямку. Ці пристрої широко використовуються в різному обладнанні ОТС, зокрема у волоконно-оптичних підсилювачах.

### 3.9 Конфігурації основних вузлів ОТМ

Обладнання оптичних транспортних платформ базується на модульному принципі побудови, що забезпечує просте додавання або видалення необхідних плат або модулів та зміну програмного забезпечення. Це дозволяє створювати різні конфігурації мережних елементів та вузлів мережі.

Залежно від заданих функцій ОТМ до її складу можуть входити такі типи вузлів: вузол підсилення оптичних сигналів, термінальний вузол, вузол вводу/виводу оптичних сигналів та вузол крос-комутації оптичних сигналів.

Основними функціями вузла підсилення оптичних сигналів є підсилення багатохвильового оптичного сигналу, компенсація хроматичної дисперсії та забезпечення контролю й управління вузлом.

На рисунку 3.22 відображена структурна схема цього вузла.

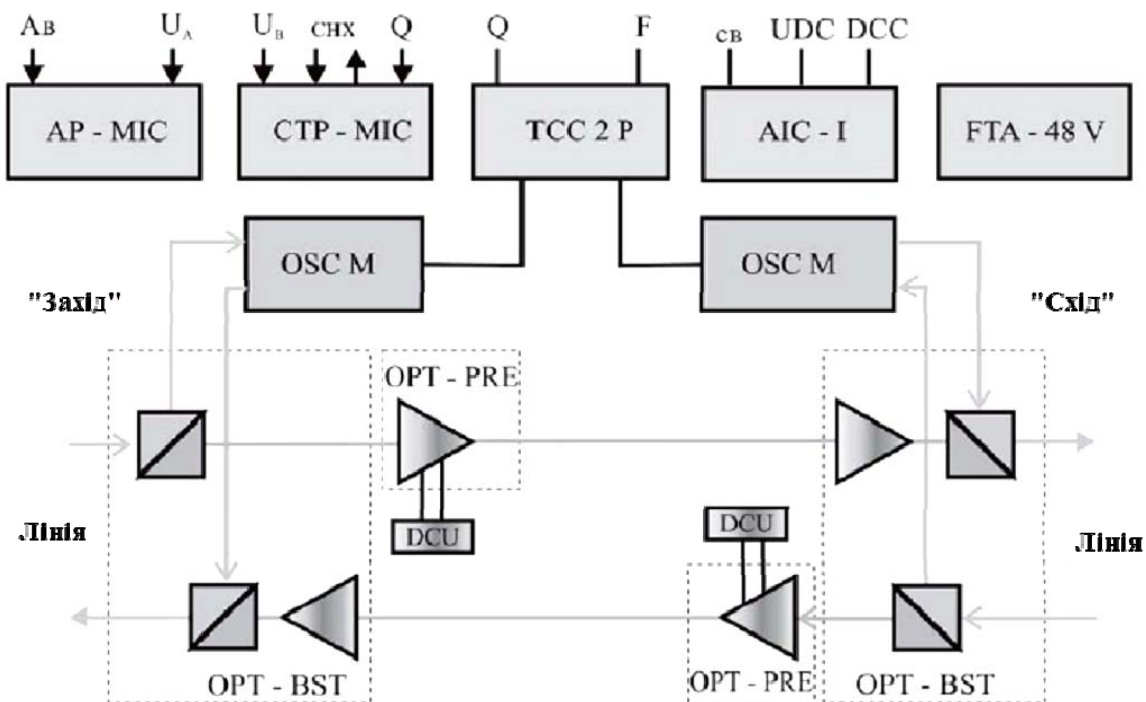


Рисунок 3.22 – Структурна схема вузла підсилення оптичних сигналів

Принцип дії вузла підсилення оптичних сигналів полягає в такому. Вхідний лінійний сигнал надходить в демультимплексор каналу контролю та керування, в якому виконується розподіл агрегатного сигналу на скла-

дові: багатохвильовий інформаційний сигнал (1530 – 1560 нм) та сигнал контролю і керування OSC (1510 нм).

В попередньому (OPT-PRE) та вихідному (OPT-BST) оптичних підсилювачах здійснюється відновлення амплітуди багатохвильового інформаційного сигналу, тобто виконується регенерація багатохвильового інформаційного сигналу типу 1R.

В модулі OSCM виконується перетворення сигналів контролю та керування OSC з формату STM-1 в сигнали заголовка оптичного транспортного модуля OOS, після чого здійснюється їх аналіз та використання в платі TCC2P. Також в цій платі формуються нові сигнали заголовка OOS, після чого передаються в модуль OSCM, де вони вводяться в канал контролю та керування.

Далі з вихідного інтерфейсу рівня STM-1 модуля OSCM сторони «схід» OSC-сигнал надходить на вхід мультиплексору каналу контролю та керування, де він об'єднується з відновленим багатохвильовим інформаційним сигналом і, в результаті чого, формується агрегатний сигнал, який передається до наступної ділянки лінійного тракту. Аналогічні перетворення інформаційного сигналу відбуваються і в зворотному напрямку.

Основними функціями вузла термінації оптичних сигналів є підсилення багатохвильових оптичних сигналів, компенсація хроматичної дисперсії, термінація оптичних DWDM-сигналів, забезпечення контролю та керування обладнанням мережного елемента.

На рисунку 3.23 показано структурну схему вузла термінації оптичних DWDM-сигналів.

Перетворення сигналів на прийомі відбувається таким чином. Лінійний сигнал надходить на вхід демультимплексора каналу контролю та керування, в якому виконується розподіл агрегатного сигналу на складові: багатохвильовий інформаційний сигнал OCG (1530 – 1560 нм) та сигнал контролю й керування OSC (1510 нм).

В попередньому підсилювачі (OPT-PRE) відновлюється амплітуда багатохвильового сигналу С-діапазону. Після цього відновлений сигнал подається на вхід плати оптичного демультимплексора 32-DMX, в якій він розподіляється на каналні сигнали (термінується). Потім сигнали з оптичних каналів за допомогою транспондерів перетворюються в клієнтські сигнали.

В модулі OSCM виконується перетворення сигналів контролю та керування OSC з формату STM-1 в сигнали заголовка оптичного транспортного модуля, після чого їх використовують в платі TCC2P.

Далі, в модулі OSCM відбувається перетворення сигналів заголовків OOS з плати TCC2P до формату сигналів. Після чого, з вихідного інтерфейсу STM-1 вони надходять в мультиплексор каналу контролю та керування модуля OSCM, в якому об'єднуються з багатохвильовим інформаційним оптичним сигналом. В результаті формується агрегатний сигнал OTM для передавання в лінійний тракт.

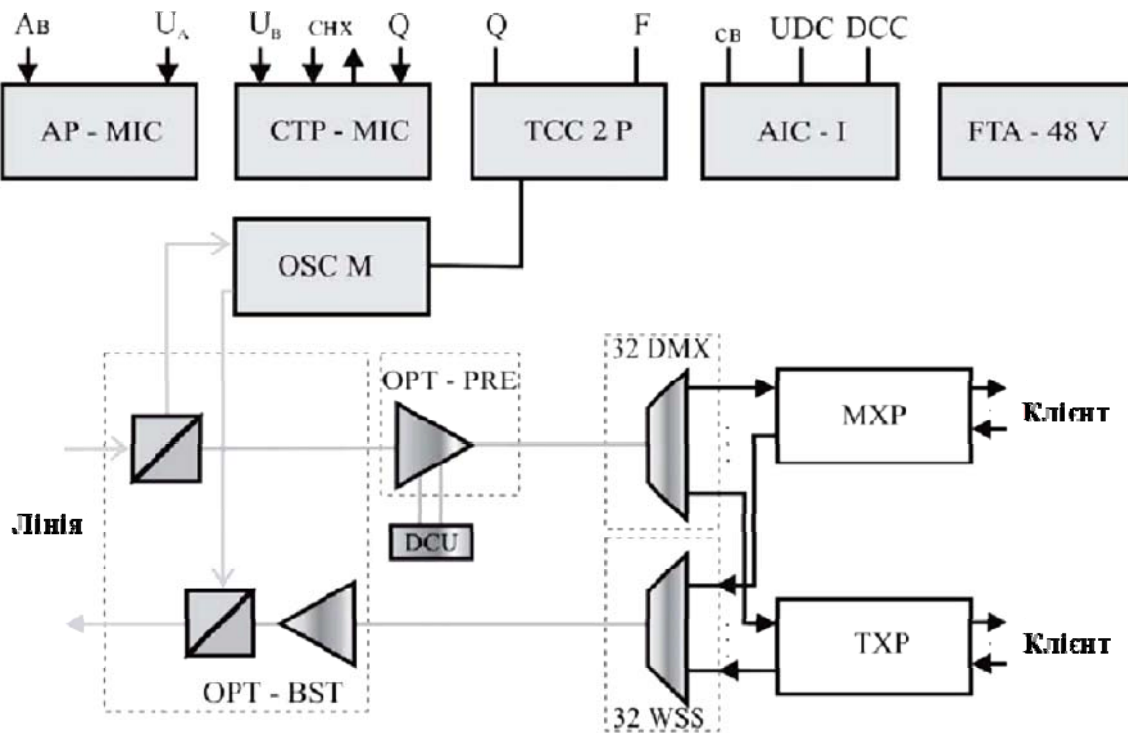


Рисунок 3.23 – Структурна схема вузла термінації DWDM-сигналів

Основними функціями вузла вводу/виводу оптичних сигналів є підсилення багатохвильових оптичних сигналів, компенсація хроматичної дисперсії, ввід/вивід оптичних DWDM-сигналів, забезпечення контролю та керування обладнанням мережного вузла.

Структурну схему вузла вводу/виводу оптичних сигналів показано на рисунку 3.24. Перетворення сигналів в цьому вузлі відбувається таким чином. Лінійний агрегатний сигнал OTM в демультимплексорі каналу контролю та керування розділяється на багатохвильовий інформаційний сигнал OCG та сигнал каналу контролю і керування OSC.

В попередньому підсилювачі (OPT-PRE) відновлюється амплітуда багатохвильового сигналу С-діапазону. Після цього відновлений сигнал через розгалужувач 32-WSS подається на вхід оптичного демультимплексора 32-DMX, в якому виділяється частина оптичних сигналів, а інші сигнали проходять транзитом в плату 32-WSS.

В модулі OSCM виконується перетворення сигналу каналу контролю та керування OSC в сигнали заголовків OOS, які надходять в плату TCC2P, для їх оброблення та формування нових сигналів заголовків OOS для модуля OSCM сторони «схід», де вони вводяться в канал контролю та керування.

З вихідного інтерфейсу STM-1 модуля OSCM сторони «схід» OSC сигнал надходить до мультиплексора каналу контролю та керування, де він об'єднується з багатохвильовим інформаційним сигналом OCG. В результа-

ті, формується агрегатний сигнал, який передається до наступної ділянки лінійного тракту ОТМ.

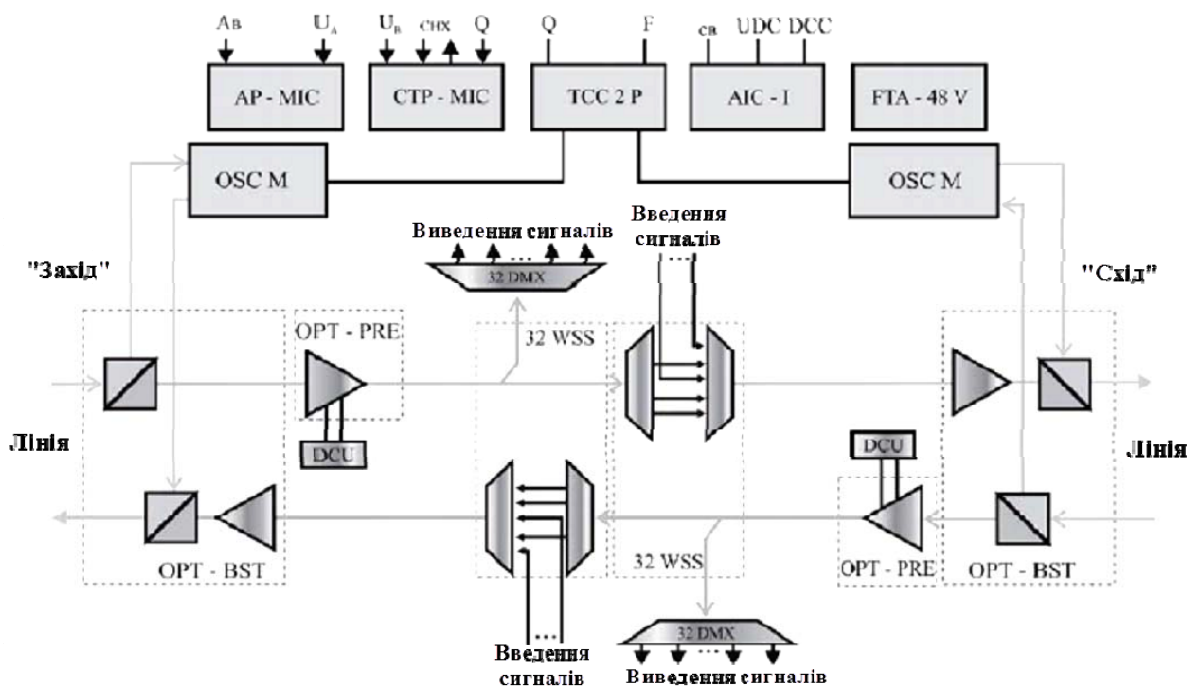


Рисунок 3.24 – Структурна схема вузла вводу/виводу оптичних сигналів

Основними функціями вузла крос-комутації оптичних сигналів є підсилення оптичних сигналів, компенсація хроматичної дисперсії, крос-комутація оптичних сигналів, ввід/вивід оптичних сигналів, забезпечення контролю та керування обладнанням мережного вузла.

Структурну схему вузла крос-комутації оптичних каналів показано на рисунку 3.25.

Перетворення сигналів в цьому вузлі відбувається таким чином. Лінійний агрегатний сигнал ОТМ в демультиплексорі каналу контролю та керування розподіляється на багатохвильовий інформаційний сигнал OCG та сигнал контролю і керування OSC.

Після цього багатохвильовий інформаційний сигнал за допомогою попереднього підсилювача (OPT-PRE) відновлюється за амплітудою та подається через розгалужувач плати 40-WXC на вхід оптичного демультиплексора 40-DMX-C, в якому виділяється частина оптичних сигналів, а інші сигнали проходять транзитом до патч-панелі PP-MESH (порт COM RX).

Потрібно відмітити, що порти EXP TX за допомогою багатоволоконних оптичних кабелів з'єднуються з портами прийому EXP RX плат 40-WXC-C відповідних напрямків.

В платах 40-WXC-C виконується демультиплексування багатохвильових сигналів, тобто здійснюється програмний вибір необхідних комбінацій оптичних сигналів та їх мультиплексування і передавання до загальних портів COM TX.

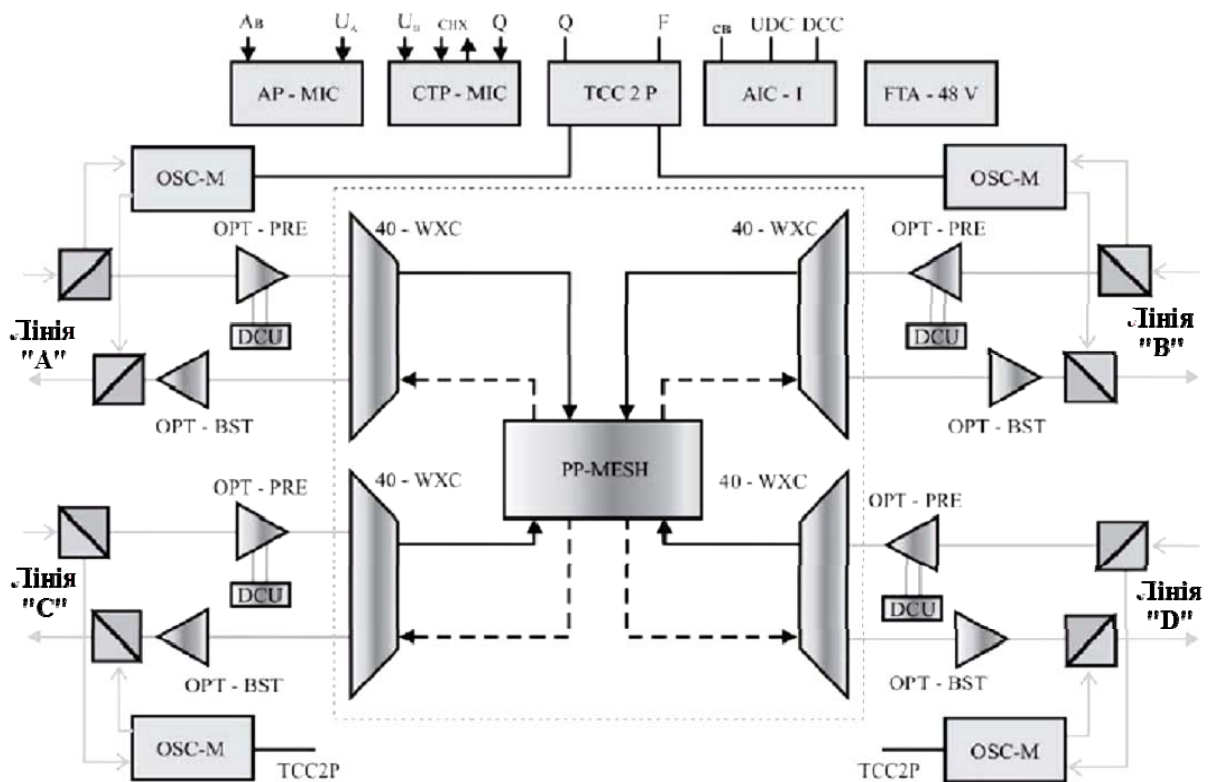


Рисунок 3.25 – Структурна схема вузла крос-комутації оптичних сигналів

Багатохвильові сигнали з кожного напрямку підсилюються за допомогою вихідних оптичних підсилювачів (OPT-BST) та в мультиплексорах сигналів каналу контролю й керування об'єднуються з сигналами каналу контролю та керування OSC і в результаті чого формуються агрегатні сигнали для передавання в ВОЛТ.

Підвищена пропускна здатність клієнтських портів в обладнанні ONS15454 забезпечена за рахунок використання в їх складі плат одномодульних ROADM типу 40-SMR1-C та 40-SMR2-C. Ці плати характеризуються високим рівнем інтеграції, тобто можуть виконувати функції: вводу/виводу сигналів каналу OSC, попереднього та вихідного оптичних підсилювачів, крос-комутатора довжин хвиль WXC. На базі цих плат можуть бути створені два типи мережних вузлів: динамічні вузли вводу/виводу оптичних каналів та вузли крос-комутації оптичних каналів.

### Контрольні завдання

1. Вкажіть параметри ключових компонентів ОТС.
2. Поясніть необхідність та умови використання підсилювачів в ОТМ.
3. Вкажіть типи ОП та поясніть їх параметри й принципи роботи.
4. Поясніть вимоги, що висувуються до лінійних сигналів однохвильових оптичних систем передавання.

5. Вкажіть найефективніший тип ОП та поясніть свій вибір.
6. Поясніть будову ербієвих волоконних підсилювачів та особливості їх використання.
7. Поясніть будову раманівських волоконних підсилювачів та особливості їх використання.
8. Поясніть призначення активних волоконно-оптичних ліній затримки.
9. Вкажіть типи джерел оптичного випромінювання та охарактеризуйте їх.
10. Поясніть призначення та будову модулятора Маха-Цендера.
11. Вкажіть типи передавальних оптичних модулів та поясніть принципи їх побудови.
12. Вкажіть найефективніший тип оптичного передавача та поясніть свій вибір.
13. Вкажіть типи оптичних модуляторів та поясніть принципи їх роботи.
14. Поясніть умови використання оптичних приймачів.
15. Поясніть принципи побудови оптичних приймачів з прямим детектуванням сигналів та охарактеризуйте їх.
16. Поясніть принципи побудови оптичних приймачів з когерентним детектуванням сигналів та охарактеризуйте їх.
17. Поясніть параметри приймальних оптичних модулів.
18. Вкажіть найефективніший тип оптичного приймача та поясніть свій вибір.
19. Вкажіть типи пасивних оптичних компонентів ВОСПІ та поясніть їх призначення.
20. Вкажіть типи, принципи побудови волоконно-оптичних розгалужувачів та об'єднувачів і поясніть умови їх використання.
21. Вкажіть типи та поясніть будову оптичних з'єднувачів.
22. Вкажіть типи волоконно-оптичних комутаторів та перемикачів і поясніть їх призначення.
23. Вкажіть типи та принцип побудови крос-комутаторів оптичних каналів.
24. Поясніть призначення оптичних ізоляторів.
25. Вкажіть типи та основні параметри волоконно-оптичних ліній затримки.
26. Поясніть умови використання пасивних оптичних компонентів ВОСПІ.



## 4 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВОЛТ

### 4.1 Особливості структур ВОЛТ

ВОСП, в яких оптичний сигнал передається на одній хвилі, називаються однохвильовими. Параметри цих ВОСП СЦІ регламентовані нормами рекомендації G.957, згідно з якою міські та регіональні ОТС СЦІ працюють в одному з двох оптичних діапазонів хвиль: 1260–1360 нм (2 ВП) або 1500–1580 нм (3 ВП, діапазон С). Залежно від діапазону робочих хвиль довжина ВОЛТ без НРП для цих ВОСП становить: до 40 км – 2 ВП; до 80 км – 3 ВП.

На рисунку 4.1 відображено принцип побудови двоволоконного, однокабельного та односмугового ВОЛТ.

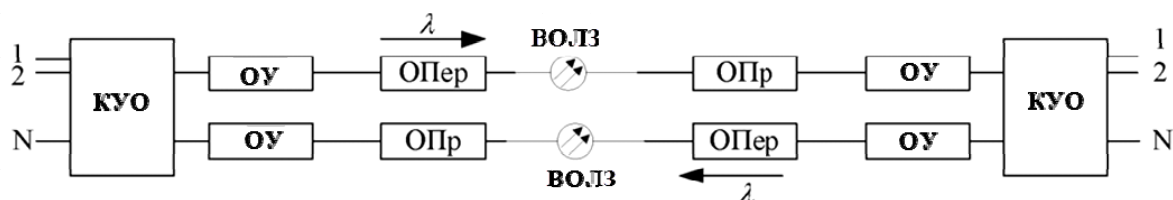


Рисунок 4.1 – Принципи побудови двоволоконного односмугового однокабельного ВОЛТ

Призначення вузлів на рисунку 4.1: КУО – каналотворювальне обладнання; ОУ – обладнання узгодження; ОПер – оптичний передавач; ОПр – оптичний приймач.

Перевагою цих ОТС є використання в їх складі однотипного обладнання трактів передавання та прийому на кінцевих та проміжних ділянках ВОЛТ, а їх недоліком є досить низький коефіцієнт використання пропускної здатності ОВ. Для підвищення ефективності використання пропускної здатності ОВ використовується передавання інформації в двох напрямках по одному ОВ (односмугові, однохвильові, однокабельні ВОЛТ) при використанні на кінцевих ділянках ВОЛТ оптичних розгалужувальних пристроїв (рис. 4.2).

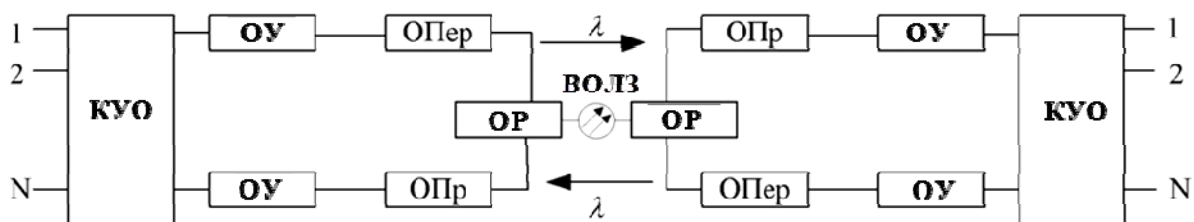


Рисунок 4.2 – Принципи побудови одноволоконного, односмугового та однокабельного ВОЛТ

Потрібно відмітити, що характерною особливістю дуплексних ОТС є наявність в них перехідних завад між зустрічними інформаційними потоками, які виникають через релеївське розсіювання в ОВ та розгалужувачах.

На рисунку 4.3 відображено принцип побудови одноволоконного, двосмугового, однокабельного ВОЛТ, в якому передавання та прийом інформаційного потоку виконується в різних ВП ОВ. При цьому, розподіл напрямків передавання та прийому здійснюється за допомогою спрямовуючих оптичних фільтрів (ОФ), які налаштовано на відповідні робочі довжини хвиль.

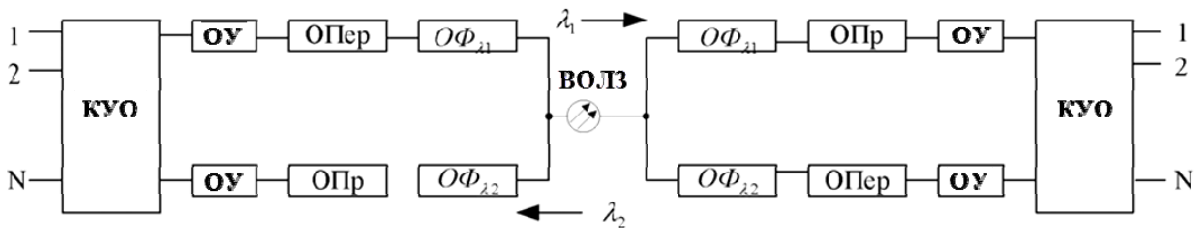


Рисунок 4.3 – Принцип побудови одноволоконного, двосмугового, однокабельного ВОЛТ

За аналогічним принципом будуються багатосмугові, однокабельні ВОЛТ, в яких за допомогою мультиплексорів та демультимплексорів можна передавати по одному ОВ  $N$  спектрально розподілених ОК $_n$ , що збільшує коефіцієнт використання пропускної здатності ОВ.

Для ОТС СЦІ (STM-16 – 2,5 Гбіт/с), які будуються згідно з конфігурацією, що на рисунку 4.4 та працюють в 2 ВП або 3 ВП, середня потужність передавача дорівнює -3 – 3 дБм.

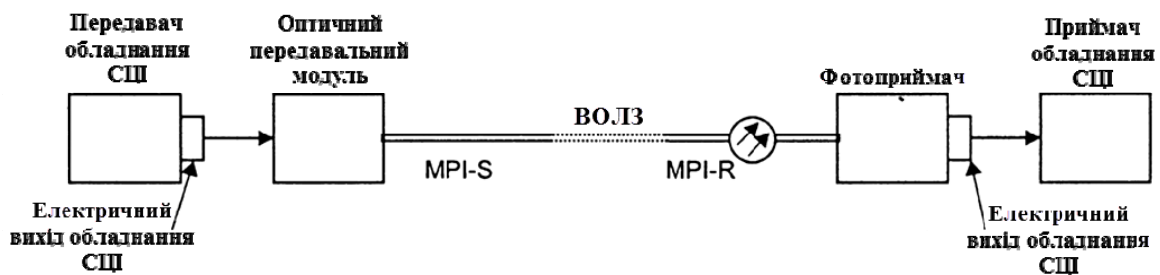


Рисунок 4.4 – Конфігурація ОТС СЦІ згідно з рекомендацією G.957

Магістральні однохвильові ОТС СЦІ можуть передавати інформаційний трафік з швидкостями: 2,5 Гбіт/с (STM-16), 10 Гбіт/с (STM-64) та 40 Гбіт/с (STM-256) в діапазонах хвиль 1530–1565 нм (діапазон С) та 1565–1625 нм (діапазон L) з використанням оптичних підсилювачів. Параметри цих систем регламентовані нормами G.691 та будуються згідно з конфігурацією, що зображена на рисунку 4.5.

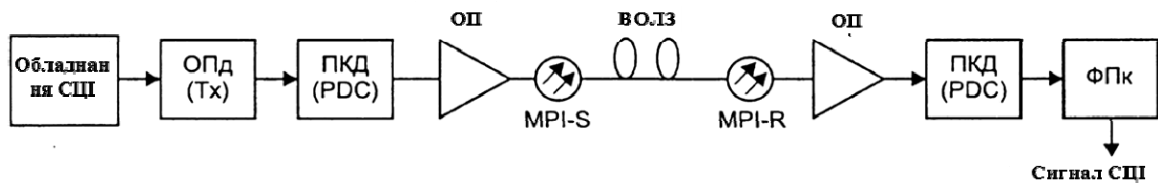


Рисунок 4.5 – Конфігурація ОТС СЦІ згідно з рекомендацією G.691

Принцип дії цих ОТС СЦІ (рис. 4.5) базується на перетворенні електричного сигналу в оптичний в коді NRZ та наступному корегуванні за допомогою компенсатора хроматичної дисперсії (пристрою компенсування дисперсії – ПКД) і підсиленні в оптичному підсилювачі потужності (ОПП). На приймальній стороні ВОЛТ цих ОТС оптичний сигнал підсилюється в попередньому підсилювачі, корегується в пасивному компенсаторі хроматичної дисперсії і надходить на оптичний вхід групоутворювального обладнання СЦІ. Потрібно відмітити, що використання xWDM-методів ущільнення при побудові ОТС СЦІ потребує дотримання жорстких вимог щодо параметрів носійних сигналів в окремих ОКн, а саме: стабільності оптичної частоти, ширини спектральної лінії випромінювання, рівномірності АЧХ оптичних підсилювачів (ОП) та оптичного тракту (ОТ).

Першими були створені двохвильові ОТС з WDM з робочими хвилями 1310 нм та 1550 нм. В таких ОТС з СРК через велике спектральне рознесення носійних частот відсутній взаємний вплив між ОКн. Цей підхід дозволяє або подвоїти швидкість передавання по одному ОВ, або організувати дуплексний зв'язок (рис. 4.6).

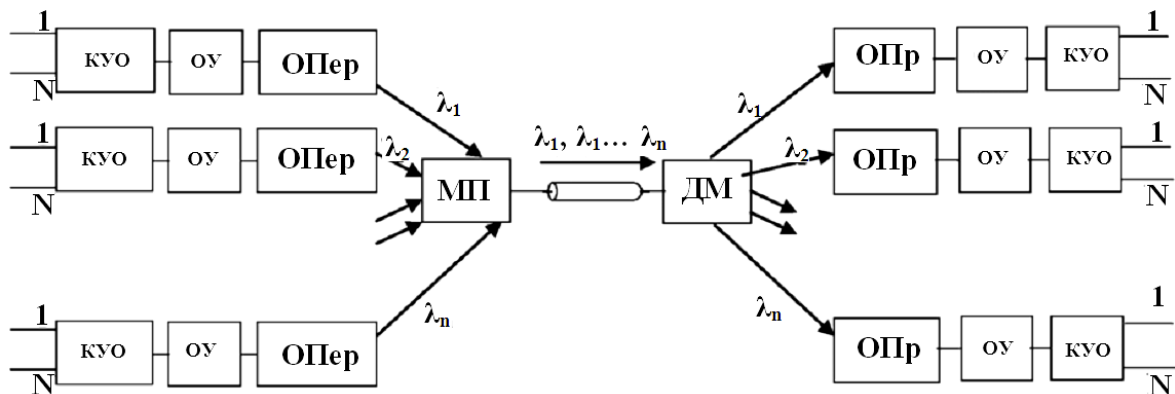


Рисунок 4.6 – Структурна схема двоволоконної ОТС з СРК

Як видно на рисунку 4.7, узагальнена структурна схема ОТС СЦІ з СРК складається з оптичного передавача, оптичного приймача та головного оптичного тракту.

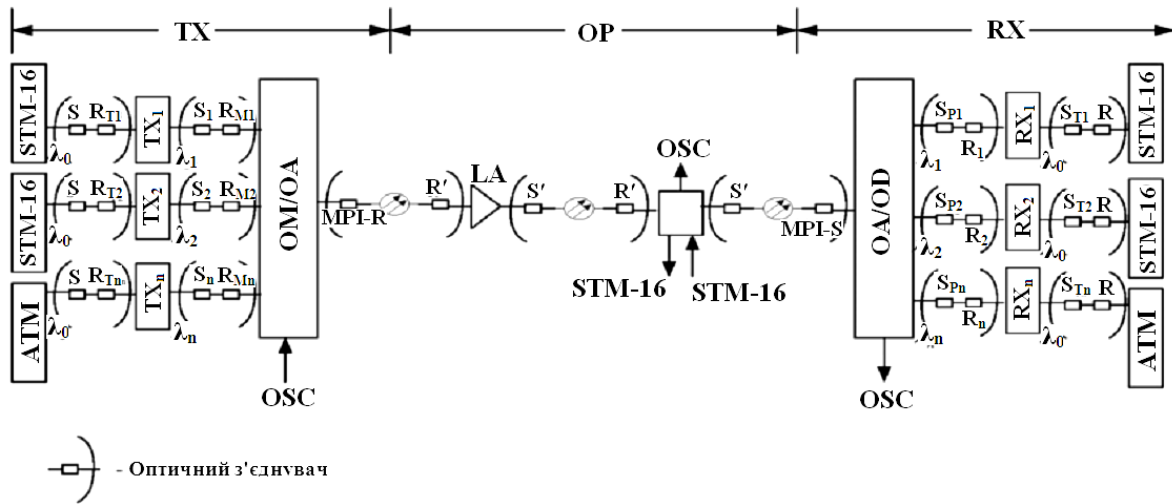


Рисунок 4.7 – Структурна схема двоволоконної, багатосмугової, однокабельної ОТС СЦІ з СРК

Оптичний передавач складається з каналних прийомопередавачів (транспондерів), які забезпечують перетворення сигналів STM-N (або ATM) в оптичні сигнали, що об'єднуються в груповий оптичний сигнал за допомогою оптичного мультиплексора з шириною спектра згідно з виразом:

$$\Delta f_{\text{гс}} = \Delta f_{\text{кс}} + (n - 1) \cdot \Delta f_{\text{нчр}},$$

де  $\Delta f_{\text{кс}}$  – спектр каналного сигналу;

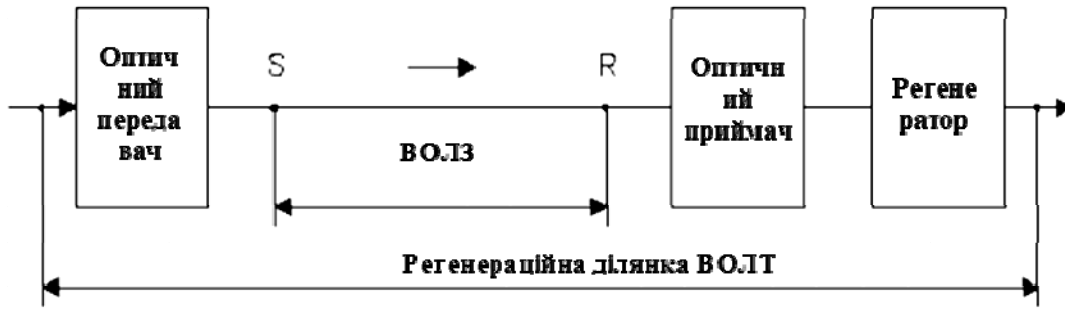
$\Delta f_{\text{нчр}}$  – частотне рознесення каналів.

В результаті підсилення групового сигналу кінцевим ОП (бустером) в інтерфейсі MPI-S встановлюється необхідна загальна потужність лінійного сигналу. В основному сучасні ВОЛТ складаються з лінійних оптичних підсилювачів, які компенсують згасання, що виникає в ОП. Але в ОТС з СРК можуть використовуватись три типи ОП: лінійний, попередній та підсилювач потужності. Також ОП можуть бути замінені на мультиплексор вводу/виводу каналів (OADM).

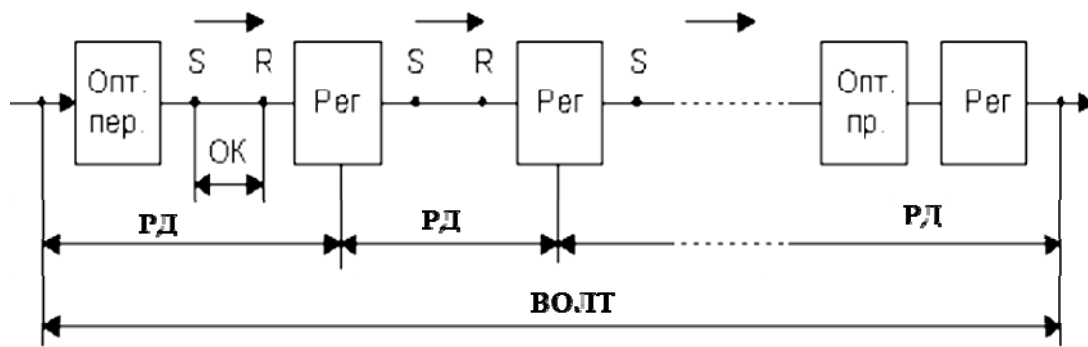
## 4.2 Особливості архітектур ВОЛТ

Лінійні тракти оптичних систем передавання поділяються на безпровідні (атмосферні) та провідні (волоконно-оптичні). ВОЛТ поділяються на однохвильові та багатохвильові. Принципи побудови однохвильових ВОЛТ показано на рисунку 4.8.

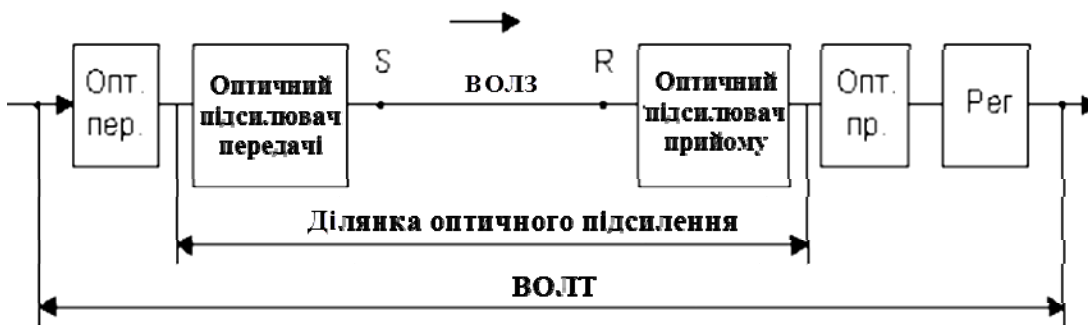
Значення максимальної довжини ВОЛТ без регенерації визначається такими факторами: параметрами ОП (згасанням та дисперсією) і параметрами оптичного передавача та приймача.



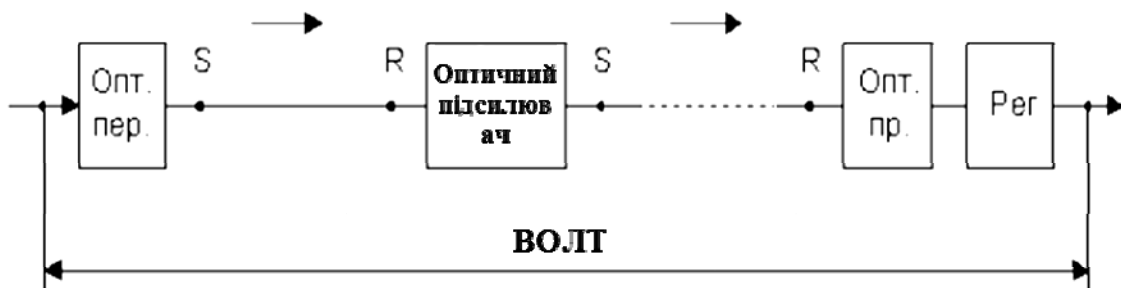
а) Простий ВОЛТ



б) ВОЛТ з електронними регенерацiями



в) ВОЛТ з оптичними підсилювачами передавання та прийому

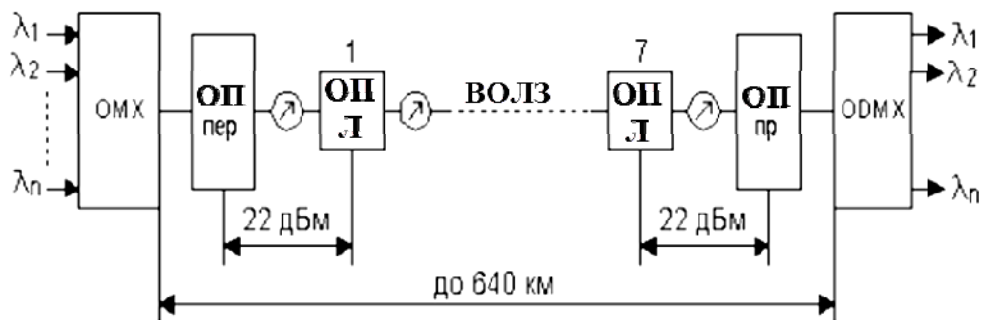


г) ВОЛТ з проміжними оптичними підсилювачами

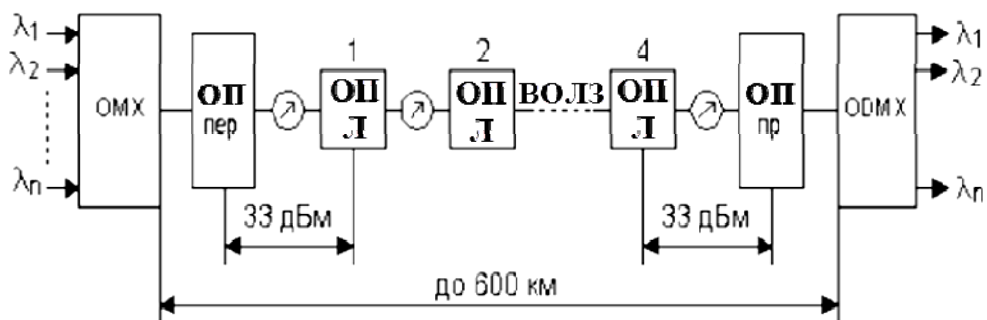
Рисунок 4.8 – Варіанти будови однохвильових ВОЛТ

Згідно з рекомендацією G.692 багатохвильові ВОЛТ з оптичними підсилювачами поділяються на три типи:

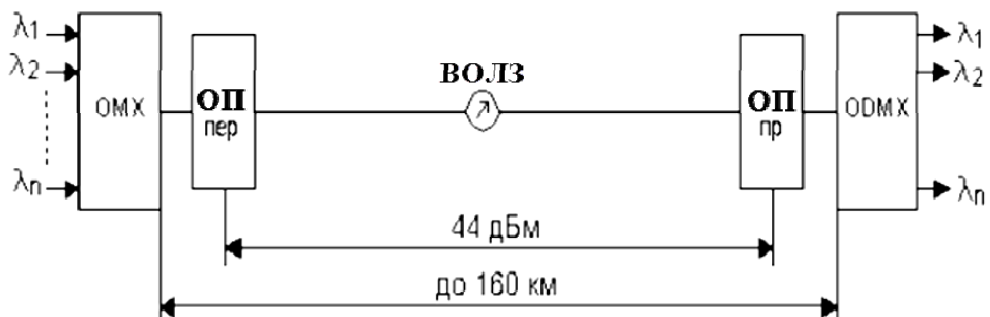
- 1 тип з довжиною до 80 км, затушенням потужності оптичного сигналу 22 дБ (L – довга ВОЛЗ) та можливістю використовувати до 7 проміжних оптичних підсилювачів при загальній довжині ВОЛЗ до 640 км (рис. 4.9, а);
- 2 тип з довжиною до 120 км, затушенням потужності оптичного сигналу 33 дБ (V – дуже довга ВОЛЗ) та можливістю використовувати до 4 проміжних оптичних підсилювачів при загальній довжині ВОЛЗ до 600 км (рис. 4.9, б);
- 3 тип з довжиною до 160 км, затушенням потужності оптичного сигналу 44 дБ (U – наддовга ВОЛЗ) та відсутністю проміжних підсилювачів при загальній довжині ВОЛЗ до 150 км (рис. 4.9, в).



а) багатохвильовий ВОЛТ L-типу



б) багатохвильовий ВОЛТ V-типу



в) багатохвильовий ВОЛТ U-типу

Рисунок 4.9 – Варіанти будови багатохвильових ВОЛТ

Потрібно відмітити, що використання широкосмугових компенсаторів дисперсії дозволяє збільшувати довжину регенераційної ділянки багатохвильового ВОЛТ. Узгодження взаємодії однохвильових та багатохвильових ВОЛТ здійснюється за допомогою транспондерів, які забезпечують формування необхідної носійної частоти для багатохвильового ВОЛТ та усувають фазове дрижання тактових імпульсів. На рисунку 4.10 показано узагальнену схему підключення передавача однохвильової ВОСПІ до транспондера багатохвильової ВОСПІ.

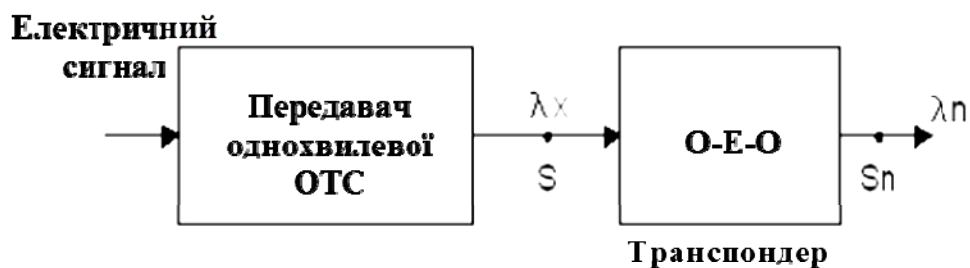


Рисунок 4.10 – Структура використання транспондера при узгодженні однохвильової та багатохвильової ВОСПІ

Очевидно, що нарощування пропускної здатності ВОЛТ за допомогою методів часового ущільнення є малоефективним. Тому вирішення задачі підвищення пропускної здатності здійснено за допомогою методів спектрального мультиплексування xWDM. Сутність технології xWDM полягає в тому, що інформаційні потоки (STM-N) в кількості 2, 4, 6, 8, ..., n передаються на відповідній носійній частоті оптичного діапазону, як показано на рисунку 4.11. Кількість носійних оптичних хвиль для 3 ВП становить 41.

Потрібно відмітити, що при побудові багатохвильових ВОЛТ необхідно забезпечувати виконання ряду вимог:

- параметри ОК мають відповідати стандартам (G.652, G.653, G.654, G.655, G.656);
- параметри оптичних лінійних підсилювачів мають відповідати рекомендаціям (G.662, G.663, G.665);
- параметри оптичних компонентів ВОЛТ мають відповідати стандарту (G.671);
- правила побудови ВОЛТ багатохвильових ОТС мають відповідати рекомендаціям (G.681, G.691, G.692, G.694.1, G.694.2, G.805, G.871, G.872, G.957, G.958, G.959.1);
- принцип побудови ВОЛТ має враховувати вимоги щодо часткового або повного резервування обладнання (схеми 1:n або 1+1);
- ВОЛТ має забезпечувати гнучке нарощування кількості оптичних каналів (4, 8, 16, 32) без зміни структури, компонентів та погіршення якості роботи;

- має забезпечуватись можливість використання ВОЛЗ з одномодовими ОВ типу SMF (G.652);
- має забезпечуватись гнучке виведення/введення окремих оптичних каналів в транзитних проміжних вузлах ВОЛТ;
- ВОЛТ мають забезпечуватись вбудованими засобами контролю, вимірювань параметрів та автоматичного резервування компонентів;
- ВОЛТ має забезпечуватись можливістю включення пристроїв компенсації хроматичної та поляризаційної модової дисперсії;
- у ВОЛТ має бути враховано та мінімізовано вплив нелінійних оптичних ефектів на якість роботи оптичних каналів.

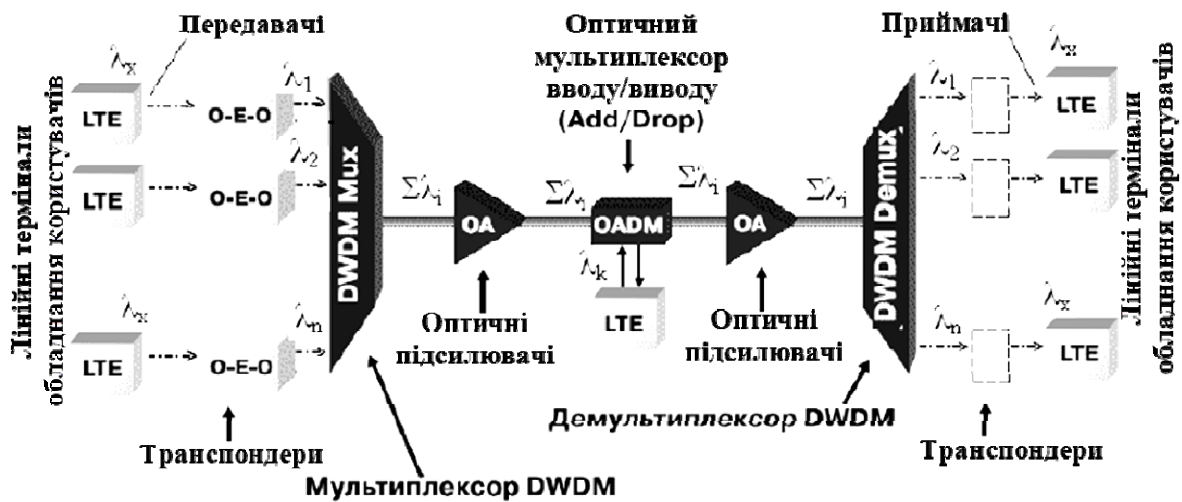


Рисунок 4.11 – Узагальнена схема багатохвильової ВОСПП

### 4.3 Особливості регенерування сигналів у ВОЛТ

Оскільки дальність передавання інформації по ОВ обмежується максимальною потужністю передавача, згасанням і дисперсією ОВ та чутливістю приймача, виникає необхідність використання у ВОЛТ ретрансляторів сигналу, які бувають як повністю оптичними так з перетворенням оптичних сигналів в електричні.

Оптичні ретранслятори коригують та підсилюють оптичні сигнали за допомогою оптичного квантового підсилювача та нелінійного поглинача. Оптичний підсилювач компенсує втрати потужності оптичного сигналу в ОВ та нелінійному поглиначі, а нелінійний поглинач зужує імпульси.

На рисунку 4.12 показано узагальнену структурну схему ретранслятора з перетворенням оптичного сигналу в електричний та наступним обробленням і регенерацією сигналу. Цей оптичний ретранслятор відрізняється від регенераторів провідних ЦСП наявністю оптичних модулів, тому до його складу входять: пристрій прийняття рішень (ППР), пристрій тактової синхронізації (ПТС), формувач сигналів (ФС).



Процес регенерації відбувається в такому порядку:

- в пристрої прийняття рішень виконується аналіз вхідного сигналу методом однократного відліку (стробування значень вхідного сигналу та їх порівняння з пороговим значенням);
- стробування вхідного сигналу здійснюється імпульсною послідовністю з виходу пристрою тактової синхронізації (рис. 4.13);
- при перевищенні порогового значення, в пристрої формування сигналу формуються імпульси заданої амплітуди та тривалості.

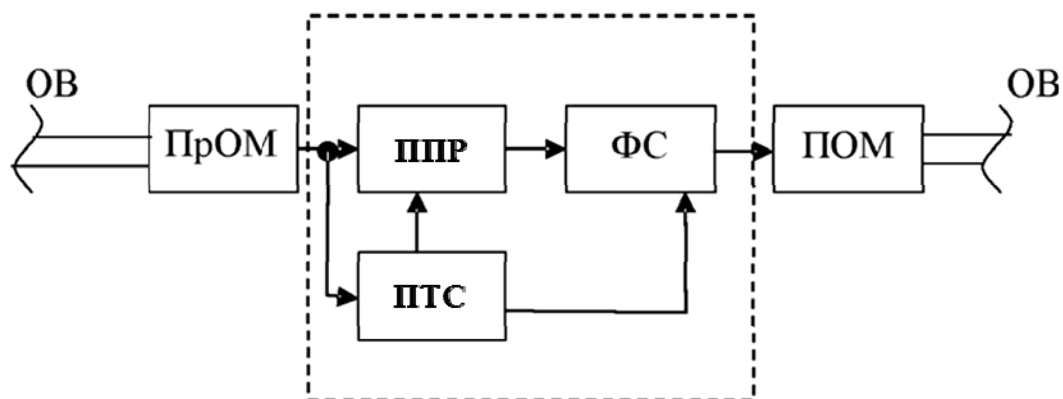


Рисунок 4.12 – Структура лінійного ретранслятора цифрових ВОСПІ

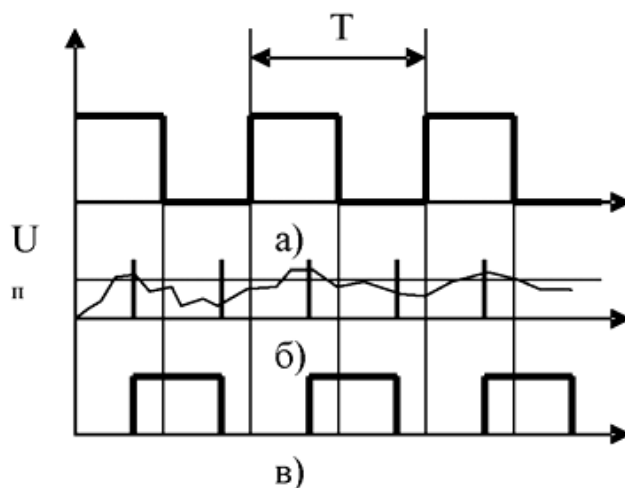


Рисунок 4.13 – Часові діаграми роботи лінійного ретранслятора

Оскільки значення загасання потужності та спотворень оптичних сигналів залежать від довжини ділянки регенерації та при збільшенні якої значення потужності оптичного сигналу  $P_{пр}$  падає плавно на будівельних відрізках ОВ та скачком в точках їх з'єднання (рис. 4.14) і тому необхідною умовою для повного відновлення сигналу є:

$$P_{\text{пер}} - a_{\text{в}} - n_{\text{р}} a_{\text{р}} - n_{\text{н}} a_{\text{н}} - l_{\text{рег}} \geq P_{\text{пр}}$$

де  $P_{\text{пер}}$  – значення потужності оптичного сигналу на виході оптичного передавача або регенератора;

$a_{\text{в}}$  – втрати потужності оптичного сигналу при введенні та виведенні сигналу в ОВ;

$a_{\text{р}}, a_{\text{н}}$  – втрати потужності оптичного сигналу на роз'ємних та нероз'ємних з'єднувачах на всій довжині регенераційної ділянки ВОЛТ ( $l_{\text{рег}}$ ).

Виконавши заміну  $Q = P_{\text{пер}} - a_{\text{в}} - P_{\text{пр.мін}}$  (енергетичний потенціал ВОСП), отримуємо формулу для визначення допустимої довжини регенераційної ділянки:

$$l_{\text{рег}} \leq \frac{Q - n_{\text{р}} a_{\text{р}} - n_{\text{н}} a_{\text{н}}}{\alpha}$$

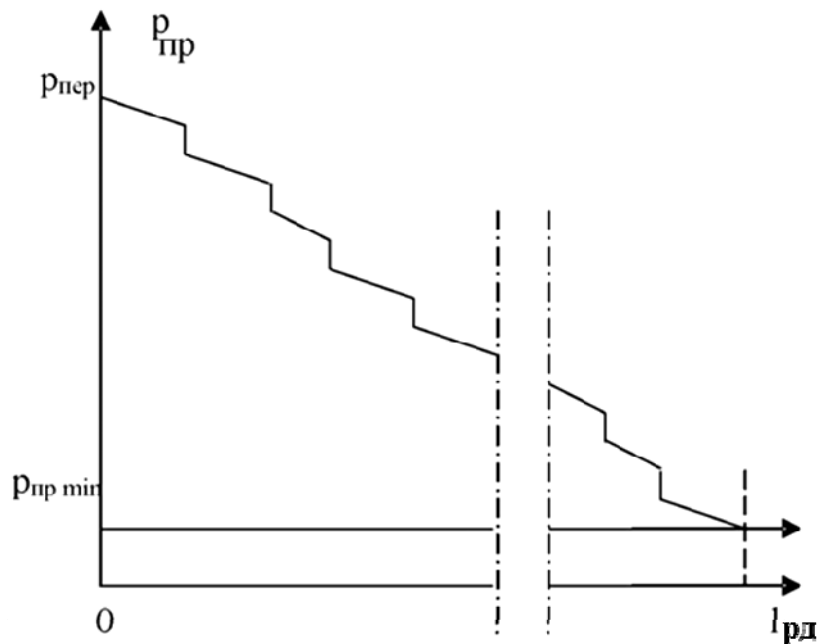


Рисунок 4.14 – Залежність рівня потужності оптичного сигналу від довжини ділянки ретрансляції

Враховуючи, що довжина регенераційної ділянки також обмежується через дисперсійні втрати, для визначення максимальної довжини регенераційної ділянки необхідно розв'язати систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\text{рег}} \leq \frac{Q - n_p a_p - n_n a_n}{\alpha} \\ I_{\text{рег}} \leq \frac{0,25}{\sigma_0 B} \end{array} \right. ,$$

де  $B$  – швидкість інформаційного потоку;

$\sigma_0$  – середньоквадратичне значення розширення імпульсу в ОВ довжиною 1 км.

Розрахунки показують суттєву перевагу ОТС над іншими ЦСП в значеннях довжини регенераційної ділянки, які становлять понад 1000 км порівняно з 6 – 10 км для ЦСП.

В довгих ВОЛТ ОТС-СР (понад 2000 км) при зниженні значення відношення потужності оптичного сигналу до потужності оптичного шуму (OSNR) нище допустимого для заданого коефіцієнта помилки ( $K_{\text{BER}}$ ) виникає необхідність в регенерації оптичних цифрових сигналів. Зниження OSNR пов'язано з накопиченням шумів в оптичних проміжних підсилювачах, що використовуються в ВОЛТ для компенсації втрат потужності оптичного сигналу.

Для відновлення OSNR оптичних сигналів в однохвилових ВОЛТ використовуються оптоелектронні регенератори. Такий підхід є неефективним в багатохвилових ВОЛТ через складність їх реалізації, тому в них використовуються повністю оптичні регенератори. Алгоритм роботи оптичних регенераторів показано на рисунку 4.15.

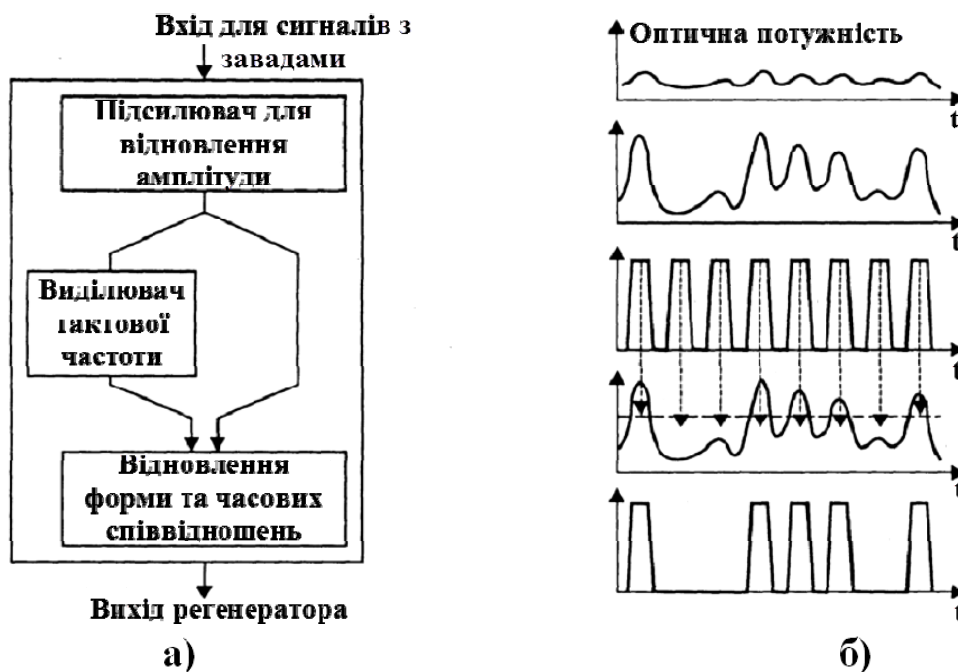


Рисунок 4.15 – а) послідовність операцій при регенерації оптичного цифрового сигналу; б) осцилограми сигналів процесу регенерації

В мережі SDH лінійний регенератор використовується для збільшення дальності передавання сигналів між вузлами мережі за рахунок усунення спотворень лінійного цифрового сигналу, які спричинені завадами і дисперсією, та складається з мультиплексора SDH з одним вхідним і вихідним портами. Оскільки цей регенератор є одностороннім пристроєм передавання цифрових сигналів, то для двостороннього передавання необхідно використовувати два таких регенератори.

Перевагами регенераторів SDH є висока стабільність тактових сигналів, що дозволяє використовувати їх як джерела сигналів тактової синхронізації у вузлах транспортної мережі.

Недоліком цих регенераторів є внесення ними додаткових фазових дрижань тактових імпульсів в оптичний лінійний сигнал, що призводить до накопичення фазових дрижань на ділянці ВОЛТ з послідовно включеними регенераторами та підвищення ймовірності помилок при регенерації сигналів.

Оптичний регенератор конструктивно складається з оптичного приймача, регенератора оптичного сигналу та оптичного передавача. Регенератор електричного сигналу з точністю до коефіцієнта помилок відновлює амплітуду та часові параметри інформаційних імпульсів.

Оптичний підсилювач без оптоелектронного перетворення за допомогою спеціальних активних ОВ та лазерів накачування підсилює оптичний сигнал. Оптичний підсилювач не забезпечує повного відновлення форми оптичного сигналу. Їх використання є особливо ефективним для ОТС з спектральним ущільненням.

Ретранслятор виконує функцію підсилення оптичного сигналу та може відновлювати форму імпульсів, зменшувати рівень шумів, усувати помилки. Згідно з методикою відновлення оптичного сигналу ретранслятори можуть виконувати функції: повторювачів або оптичних підсилювачів. За функціональними властивостями ретранслятори поділяються на типи: ретранслятори рівня 1R; ретранслятори рівня 2R; ретранслятори рівня 3R.

Ретранслятори рівня 1R можуть виконувати функції: відновлення значення потужності оптичних сигналів; компенсація накопиченої дисперсії; здійснення моніторингу роботоздатності обладнання та стабілізації рівнів оптичних сигналів. Такі ж функції можуть виконувати оптичні підсилювачі.

Ретранслятори рівнів 2R та 3R є оптичними повторювачами, які виконують підсилення та коригування з перетворенням оптичного сигналу в електричний.

Повторювачі, що відновлюють рівень та форму сигналів є ретрансляторами рівня 2R. Повторювачі, які виконують функції ретранслятора рівня 2R та відновлюють синхронізацію сигналу, називають ретрансляторами рівня 3R.

Транспондери широко використовують в CWDM- та DWDM-системах для перетворення клієнтських широкосмугових оптичних сигналів в стандартні вузькосмугові оптичні сигнали CWDM- та DWDM-технологій.

Термінальні TDM-мультиплексори з оптичними інтерфейсами, що працюють в режимі ретрансляції, можуть використовуватись як ретранслятори 3R та транспондери.

Оптичні транспондери призначені для вводу/виводу інформаційних оптичних сигналів безпосередньо в оптичні канали xWDM-обладнання та забезпечення їх регенерації в цих каналах.

За призначенням транспондери поділяються на типи:

- транспондери вводу/виводу клієнтських сигналів;
- транспондери-регенератори сигналів оптичних каналів;
- мультиплексні транспондери.

Транспондери вводу/виводу можуть підтримувати різні види клієнтських сигналів з фіксованою (сигнали SDH) та змінною (сигнали HDTV) швидкістю інформаційного потоку. Узагальнену структурну схему транспондерів вводу/виводу показано на рисунку 4.16.

Згідно з рисунком 4.16 транспондер складається з клієнтського оптичного прийомопередавача, підсистеми прямого коригування помилок (FEC) та лінійного оптичного прийомопередавача.

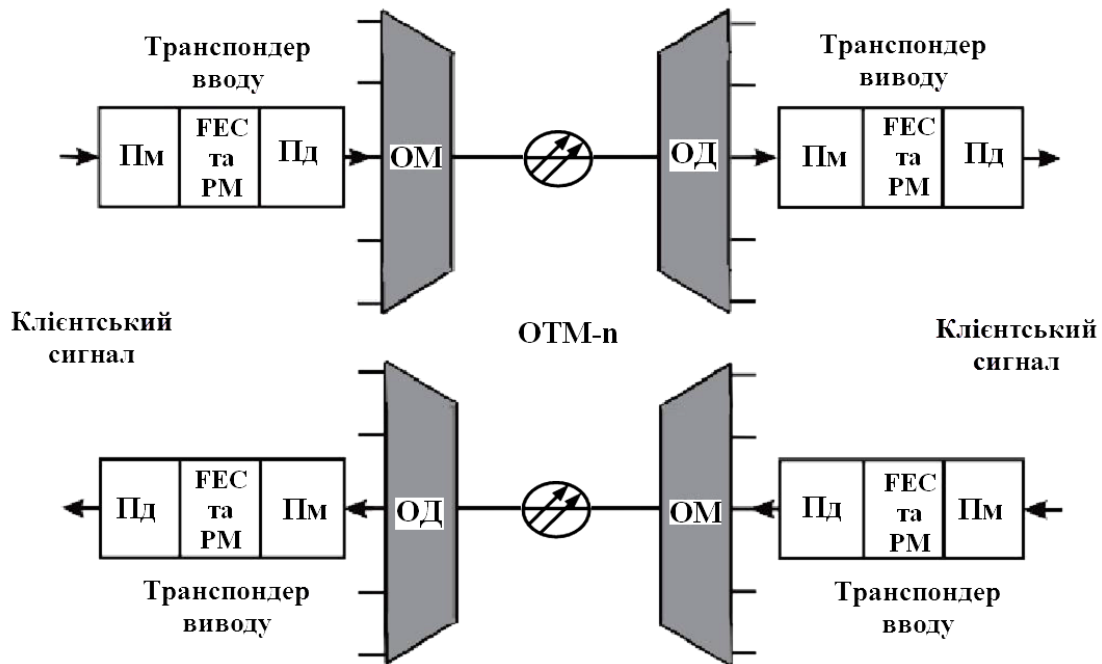


Рисунок 4.16 – Узагальнена структурна схема транспондерів вводу/виводу

Оброблення інформаційного трафіка в транспондерах вводу/виводу здійснюється таким чином. В транспондері вводу вхідний оптичний інформаційний сигнал перетворюється в електричний сигнал внутрішнього формату. Зі спектра клієнтського сигналу з фіксованою швидкістю сигналу

виділяється складова тактової частоти та формується відновлений сигнал тактової частоти. Після цього імпульси інформаційного цифрового сигналу повністю відновлюються, тобто виконується функція регенерації типу 3R (відновлення амплітуди, форми та часових співвідношень імпульсів) (рис. 4.17).

Для відновлення сигналів зі змінною швидкістю інформаційного потоку використовується регенерація типу 2R.

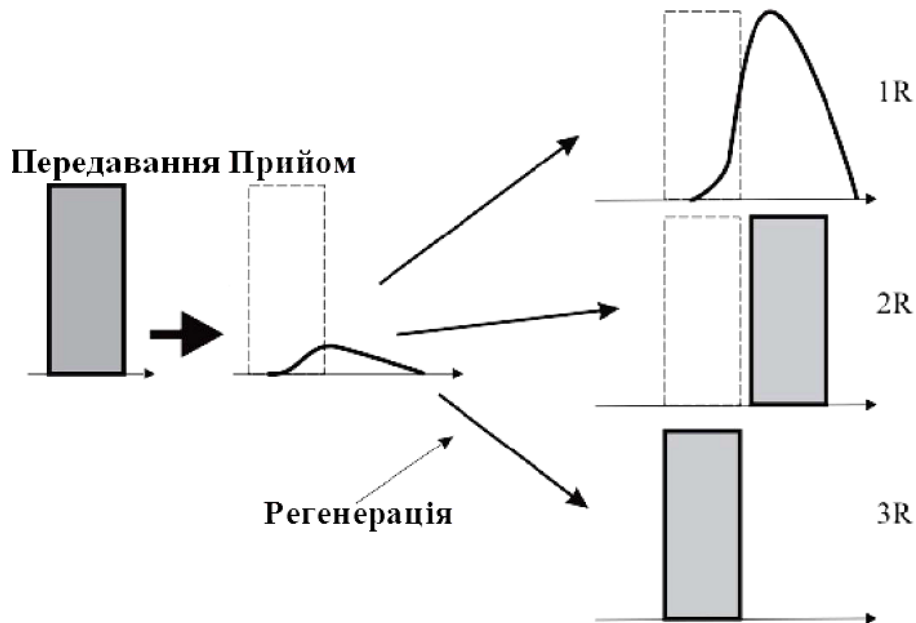


Рисунок 4.17 – Основні типи регенерації

Транспондери-регенератори обладнані лише лінійними прийомопередавачами та забезпечують регенерацію сигналів в окремих оптичних каналах (рис. 4.18).

Лінійний приймач забезпечує перетворення сигналу оптичного каналу в електричний сигнал, який після регенерації типу 3R у вигляді послідовності кодів слів подається на декодер підсистеми FEC.

Відкоригований системою прямого виправлення помилок сигнал надходить на кодер підсистеми FEC, де знову формується потік кодів слів, з якого за допомогою лінійного оптичного передавача відновлюється «кольоровий» інтерфейсний сигнал OTM-1, m.

В різних типах транспондерів підсистема FEC може працювати в таких режимах: кодування в транспондері вводу; декодування в транспондері виводу; декодування та кодування в транспондері-регенераторі.

Інформація про кількість виправлених помилок підсистемою FEC може використовуватись для моніторингу експлуатаційних показників оптичного каналу відповідно до рекомендацій (G.826, G.828, G.8201).

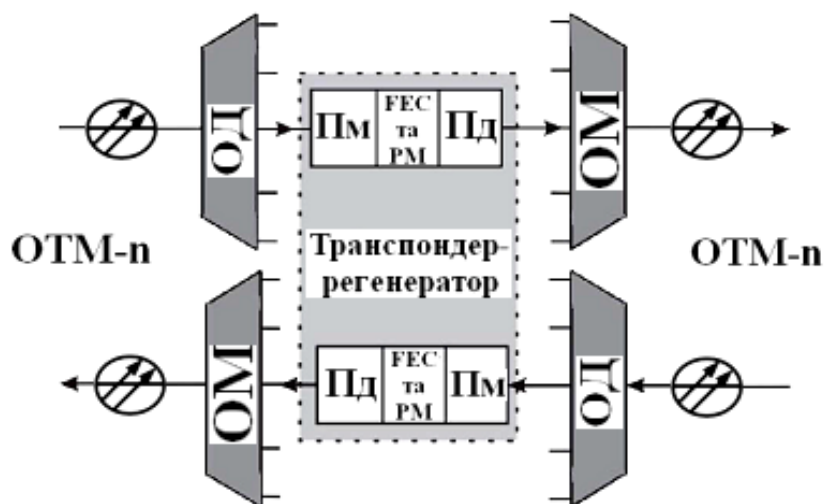


Рисунок 4.18 – Узагальнена структура транспондера-регенератора

Оптичні трансивери призначені для перетворення фізичних інтерфейсів цифрових сигналів, тобто забезпечення можливості їх узгодженого підключення до ВОЛТ.

#### 4.4 Особливості компенсації дисперсії у ВОЛТ

Використання ОТС з робочими інформаційними потоками 10 Гбіт/с створює проблему появи дисперсії сигналів в їх ВОЛТ. Використання ОП EFDA в третьому вікні прозорості забезпечує підсилення оптичних сигналів без корекції їх форми, спотвореної через дисперсію, що, в свою чергу, обмежує довжину ділянки підсилення (приблизно 100 км). Для зменшення дисперсії у ВОЛТ (для SF-волокна в діапазоні 1,55 мкм становить від 15 до 20 пс/(км.нм)) використовуються пристрої компенсації дисперсії, які дозволяють підвищити швидкості передавання сигналів.

Хроматична дисперсія – це явище розширення тривалості оптичних імпульсів в процесі їх поширення по ОВ, як показано на рисунку 4.19.

При цьому діючу ширину імпульсу можна визначити через його початкову ширину  $\Delta t_0$  згідно з формулою:

$$\Delta t = (\Delta t_0^2 + \Delta t_D^2)^{1/2},$$

де  $\Delta t_D$  – значення розширення імпульсу через хроматичну дисперсію, яке можна визначити за формулою:

$$\Delta t_D = D(\lambda) \cdot \Delta \lambda \cdot L,$$

де  $D(\lambda)$  – коефіцієнт хроматичної дисперсії;  $\Delta\lambda$  – ширина спектра інформаційного сигналу;  $L$  – довжина ВОЛТ.

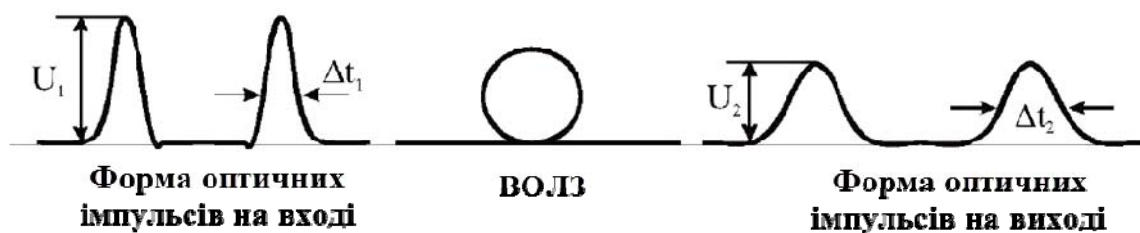


Рисунок 4.19 – Процес дії хроматичної дисперсії

Через розширення імпульсів виникають міжсимвольні завади, які в свою чергу призводять до збільшення ймовірності появи помилок на прийомі сигналу. Потрібно відмітити, що зміна ширини імпульсів супроводжується зміною їх пікової амплітуди (рис. 4.19), яку прийнято характеризувати значенням втрат по потужності:

$$q = 10 \log(P_1 / P_2),$$

де  $P_1$  – пікова потужність вхідного імпульсу;

$P_2$  – пікова потужність вихідного імпульсу.

Хроматична дисперсія виникає через те, що різні спектральні компоненти оптичного імпульсу поширюються в ОВ з різною груповою швидкістю.

Оскільки світлова хвиля поширюється по ОВ через два середовища: серцевину та кварцеву оболонку, показник заломлення для цієї хвилі дорівнює середньому значенню між значеннями показників заломлення серцевини та оболонки ОВ. Цей середній показник заломлення може змінюватись за двома причинами:

- залежності значень показників заломлення серцевини та кварцової оболонки ОВ від довжини хвилі;
- залежності глибини проникнення поля в кварцеву оболонку ОВ від зміни довжини хвилі, що призводить до зміни середнього значення показника переломлення.

Хвилеводна дисперсія виникає внаслідок хвилеводного ефекту. Хроматична дисперсія складається з суми матеріальної та хвилеводної дисперсій:

$$D_x = D_M + D_B.$$

Одномодове кварцове ОВ зі ступінчатим профілем показника переломлення характеризується нульовою дисперсією на довжині хвилі 1310 нм і тому його називають ОВ з незміщеною дисперсією.



У процесі проектування ВОЛТ при розрахунку довжини ділянки регенерації необхідно враховувати інерційність передавального і приймального пристроїв та дисперсію сигналу в ОВ, оскільки ці чинники викликають міжсимвольну інтерференцію (МСІ) та разом із згасанням обмежують довжину ВОЛТ.

В інженерній практиці інерційність активних і пасивних компонентів та всього ВОЛТ оцінюють часом наростання фронту імпульсу (ЧНФІ). Час наростання ЕОП – це час, протягом якого оптична потужність на його виході наростає з 10 % до 90 % від сталого значення при вхідному сигналі у вигляді сходинок струму (рис. 4.20, а). Час наростання та ширина смуги пропускання електричного сигналу ЕОП за рівнем -3 дБ від максимуму пов'язані співвідношенням (для випадку гаусового імпульсу відгуку ЕОП):

$$f_{-3\text{дБ}} = \frac{0,35}{t_{\text{н.ЕОП}}}.$$

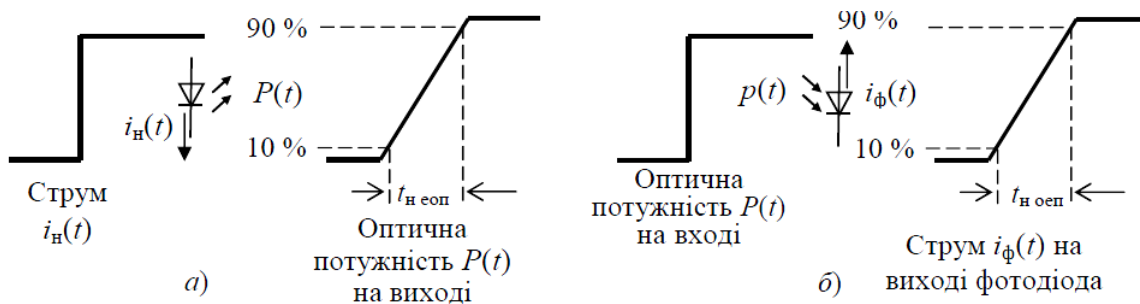


Рисунок 4.20 – Правила визначення часу наростання: а) ЕОП; б) ОЕП

Час наростання ОЕП – це час, протягом якого вихідний струм фотодіода наростає з 10 % до 90 % від сталого значення при ступінчатій зміні вхідної оптичної потужності (рис. 4.20, б). Для випадку гаусового імпульсно-го відгуку ширина смуги пропускання електричного сигналу та час наростання ЕОП за рівнем -3 дБ пов'язані співвідношенням:

$$f_{-3\text{дБ}} = \frac{0,35}{t_{\text{н.ОЕП}}}.$$

На цій частоті потужність електричного сигналу в навантаженні ОЕП дорівнює половині від значення, отриманого на низьких частотах модуляції, припускаючи в обох випадках однакову середню потужність оптичного сигналу, що надходить на фотодіод.

Інерційним (частотно-обмеженим) компонентом ВОЛТ є також середовище передавання – ОВ. Збільшення тривалості імпульсу при його розповсюдженні по ОВ у ВОЛТ називають дисперсією сигналу (рис. 4.19).

Вона призводить до зміни амплітуди та фази ВЧ складових в енергетичному спектрі сигналу, тобто до лінійних спотворень.

Таким чином, в ОТС існує обмеження дальності/якості передавання не тільки внаслідок загасання, але і в результаті дисперсії. Тому довжину ділянки регенерації (підсилення – в аналогових трактах) при проектуванні ВОЛТ розраховують двічі (за загасанням та за часом наростання) і вибирають менше з отриманих значень.

Дисперсія сигналу має розмірність часу та визначається як середньоквадратичне значення різниці тривалості імпульсів на виході  $t_2$  та вході  $t_1$  ОВ довжиною  $L$ :

$$\sigma_{\text{скз}}(l) = \sqrt{t_2^2 - t_1^2}(c).$$

В рекомендаціях та стандартах на робочій довжині хвилі нормуються такі параметри ОВ:

- для БМ ступінчатих та градієнтних ОВ – коефіцієнт широкосмуговості  $K_F$ , (МГц×км);

- для ОМ ОВ – коефіцієнт дисперсії  $\sigma$ ,  $\left(\frac{\text{пс}}{\text{нм} \times \text{км}}\right)$ .

В загальному випадку в ОВ є декілька видів дисперсії (рис. 4.21), що викликані такими чинниками:

- відмінністю траєкторій окремих мод – модовою дисперсією,  $\sigma_{\text{мод}}$ ;
- немонохроматичністю випромінювання, що розповсюджується по ОВ;
- хроматичною дисперсією,  $\sigma_{\text{хр}}$ ;
- поляризаційно модовою дисперсією,  $\sigma_{\text{пмд}}$ , що обумовлена відмінністю у швидкості розповсюдження двох взаємно ортогональних поляризаційних складових основної моди в ОМ ОВ. Цей вид дисперсії виникає при використанні інформаційних потоків понад 2,5 Гбіт/с.

Немонохроматичність світла впливає двояко: по-перше, різні спектральні складові світла розповсюджуються з різною фазовою швидкістю, викликаючи матеріальну дисперсію; по-друге, направляючі властивості ОВ залежать від довжини хвилі випромінювання реального джерела (хвильоводна дисперсія).

Існує ряд пристроїв, що здатні компенсувати дисперсію у ВОЛТ, а саме:

- волоконні компенсатори дисперсії (DCF), які побудовано на основі ОВ з складним профілем показника заломлення, що забезпечує необхідні дисперсійні властивості ОВ;

- волоконні брегівські решітки (FBG) – побудовані на основі дифракційних решіток з змінним періодом («чірповані» решітки);

- планарні хвильоводні контури з резонансними властивостями, які призводять до зсуву фаз різних спектральних компонент; пристрої, що базуються на використанні перетворення хвильового фронту.

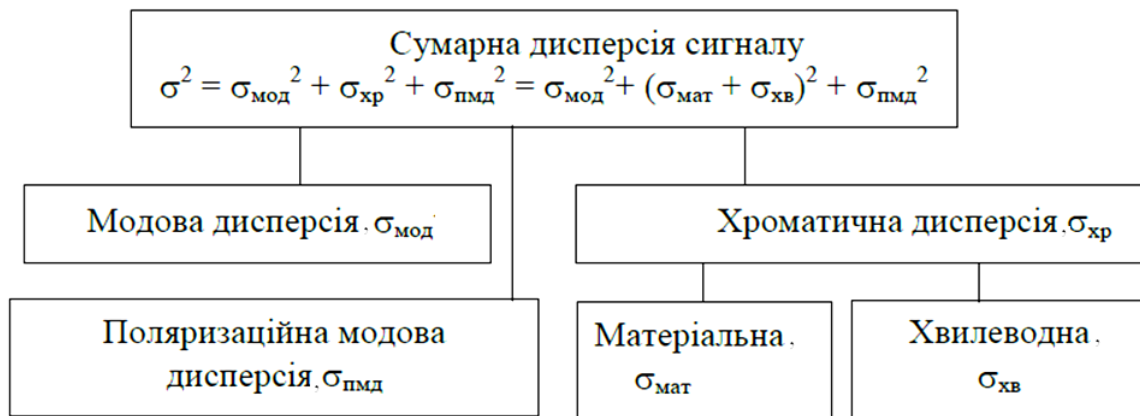


Рисунок 4.21 – Складові дисперсії сигналу в ОВ

Найбільшого використання отримали пристрої компенсації дисперсії на основі волоконних компенсаторів та «чірпованих» волоконних решіток.

Волоконні компенсатори дисперсії (DCF) будуються з відрізків ОВ з складним профілем показника заломлення, який дозволяє отримати потрібні дисперсійні властивості з якомога меншим загасанням потужності оптичного сигналу.

Оскільки значення хроматичної дисперсії накопичується пропорційно коефіцієнту  $D(\lambda_s)$  зі збільшенням довжини ОВ, то її можна компенсувати відрізком ОВ з питомою хроматичною дисперсією протилежного знака. Значення компенсувальної дисперсії визначається за формулою:

$$\sigma_{\text{КД}}(\lambda_s) = D_{\text{DCF}}(\lambda_s) \cdot L_{\text{DCF}},$$

де  $\lambda_s$  – центральна довжина хвилі джерела випромінювання.

У волоконних компенсаторах дисперсії з робочою модою  $LP_{11}$  необхідно використовувати конвертори мод. Узагальнену структурну схему такого компенсатора дисперсії відображено на рисунку 4.22.

Цей спосіб компенсації дисперсії пов'язаний з труднощами практичної реалізації конвертера мод, але має такі переваги:

- розширена спектральна смуга робочої довжини хвилі (до 100 нм);
- низький рівень шумових завад (спричинених впливом нелінійних факторів) завдяки більшій ефективній площі оптичного випромінювання;

- більш низькі оптичні втрати завдяки меншій довжині компенсуючого дисперсію ОВ;
- узгодженість значення питомої дисперсії  $D_{DCF}$  зі значенням нахилу кривої спектральної залежності  $D_{DCF}(\lambda)$ .

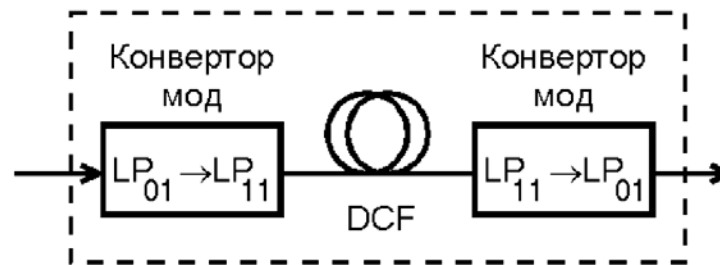


Рисунок 4.22 – Структурна схема модуля компенсації дисперсії

Компенсатор дисперсії на «чірпованій» (зі змінним кроком) брегівській решітці конструктивно складається з відрізка ОВ, вздовж якого сформовано аперіодичну решітку з лінійним законом зміни кроку. Для цих компенсаторів (FBG) є характерним зручне з'єднання з ОВ лінійного тракту, спрощена конструкція, висока надійність, можливість керувати значенням дисперсії за допомогою механічних або температурних впливів та можливість отримання високих значень дисперсії у вузькій смузі довжин хвиль.

Принцип дії таких компенсаторів базується на переході енергії з моди, яка поширюється в прямому напрямку в моду, що поширюється в зворотному напрямку. Це відбувається тоді, коли для довжини розповсюдженої хвилі виконується умова Брега:

$$\lambda_b = 2n_{ef}\Lambda(z),$$

де  $n_{ef}$  – ефективний показник заломлення;

$\Lambda(z)$  – період дифракційної решітки.

Чим більша довжина решітки, тим ширший діапазон хвиль, що підпадають під умову Брега. Для аналізу фізичних процесів в цих решітках та розрахунку їх параметрів використовують модель зв'язаних мод. Таким чином найбільш поширеними є два типи компенсаторів дисперсії в ОВ: розподілені та дискретні волоконні компенсатори.

Розподілені компенсатори дисперсії будуються на відрізках ОВ, яке виконує компенсацію дисперсії. Компенсуючі ОВ (DC) мають від'ємний коефіцієнт хроматичної дисперсії та компенсують дисперсію одномодових ОВ у широкому діапазоні довжин хвиль.

Компенсуючі дисперсію ОВ (DC) забезпечують компенсування дисперсії на всьому робочому діапазоні підсилення ОП EDFA. Перевагами розподілених компенсаторів є широкосмуговість, яка перекриває всі оптичні канали ОТС та температурна незалежність.

Основним недоліком цих компенсаторів є великі значення внесених втрат оптичної потужності (2,6 – 10 дБ), для компенсації яких необхідно використовувати додаткові ОП.

На рисунку 4.23 показано принцип коригування оптичного імпульсу модулем компенсації хроматичної дисперсії.

Дискретні компенсатори будуються на базі компенсувальних дисперсію решіток (DCG). Здвоєнні дифракційні решітки Брега з лінійно змінним періодом використовуються як такі решітки.

Перевагами дискретних компенсаторів дисперсії є: малі внесені втрати (менше 1 дБ) та габарити.

Недоліками цих компенсаторів є вузькосмуговість, тобто можливість компенсації дисперсії тільки в робочому діапазоні одного оптичного каналу та значна температурна залежність параметрів, що потребує використання температурної стабілізації.

Динамічні компенсатори дисперсії використовуються при побудові повністю оптичних мереж, коли необхідно змінювати довжину лінійного тракту під час роботи системи. В таких мережах можуть комутуватись ділянки окремих оптичних трактів, що мають різні значення дисперсії або змінні дисперсійні властивості (внаслідок дії температури, часу, потужного світлового потоку у xWDM-системах та впливу іонізуючого випромінювання).

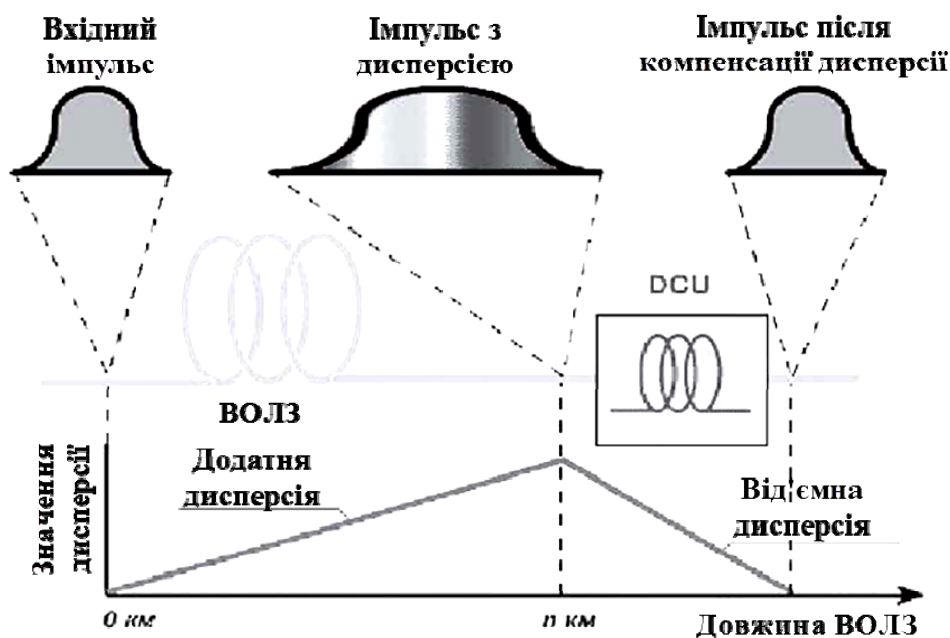


Рисунок 4.23 – Дисперсійні характеристики стандартного одномодового ОВ та DC-волокна

Одним з методів побудови динамічних компенсаторів дисперсії є механічне поєднання п'єзоелемента з відрізком ОВ чи з планарною хвильовою структурою, в якій сформована брегівська решітка. Зміна кроку цієї решітки може бути як лінійною так і нелінійною. Типовий динамічний компенсатор дисперсії може змінювати дисперсію від 300 до 1000 пс/нм та автоматично її регулювати.

Дисперсія є фактором обмеження швидкості передавання оптичних імпульсних сигналів в одномодовому ОВ. Особливо це обмеження характерне при швидкостях інформаційного потоку більше 10 Гбіт/с. Тому при використанні стандартного ОВ G.652 на довжині хвилі 1,3 мкм інформаційний потік з швидкістю 2,5 Гбіт можна передати без спотворень на відстань до 1000 км. При збільшенні швидкості інформаційного потоку до 10 Гбіт/с – дальність передавання зменшиться до 60 км та при швидкості інформаційного потоку 20 Гбіт/с – дальність передавання буде становити 15 км.

Існує два методи компенсації дисперсії: компенсація дисперсії на основі брегівських решіток (FBG) та за допомогою компенсуючих дисперсію ОВ (DCF). Технологія на основі брегівських решіток є дешевшою у використанні, вносить менші прохідні втрати та менші затримки в сигнал. Принцип побудови компенсаторів на брегівських решітках базується на інтеграції брегівських решіток в оптичний патч-корд, в результаті чого отримано модуль з функцією компенсації дисперсії (DCM-PC). Ці модулі компенсації дисперсії використовують також для усунення розбіжностей дисперсійних характеристик оптичних трансиверів на 10 Гбіт/с та на 40 Гбіт/с при їх роботі в каналах однієї DWDM OTS.

**Приклад.** Визначити значення хроматичної дисперсії одномодового ступінчатого ОВ на довжині хвилі 1550 нм та ОВ зі зміщеною дисперсією – на довжині хвилі 1310 нм. Для цього прийемо такі значення нахилу нульової дисперсії: для ОВ з ступінчатим профілем  $S_0 = 0,092 \left( \frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}} \right)$  на довжині хвилі  $\lambda_0 = 1310$  (нм) та для ОВ з зміщеною дисперсією  $S_0 = 0,085 \left( \frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}} \right)$  на довжині хвилі  $\lambda_0 = 1550$  (нм).

**Крок 1.** Для стандартного ОВ з незміщеною дисперсією значення дисперсії дорівнює:

$$D_{(\lambda=1550 \text{ нм})} = \frac{S_0 \cdot \lambda_0}{4} \cdot \left[ \frac{\lambda}{\lambda_0} - \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-3} \right] = \frac{0,092 \cdot 1310}{4} \cdot \left[ \frac{1550}{1310} - \left( \frac{1550}{1310} \right)^{-3} \right] =$$

$$= 17,5 \left( \frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}} \right).$$

**Крок 2.** Для ОВ зі зміщеною дисперсією значення дисперсії дорівнює:

$$D_{(\lambda=1310 \text{ нм})} = S_0 \cdot \lambda_0 \cdot \ln\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) = 0,085 \cdot 1550 \cdot \ln\left(\frac{1310}{1550}\right) = -22,2 \left(\frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}}\right).$$

Керування дисперсією є важливим аспектом при проектуванні ВОЛТ, при якому необхідно зменшувати вплив хроматичної та поляризаційної модової дисперсій. Отже, при побудові компенсаторів дисперсії використовують методи створення компенсуювальних дисперсію ОВ та дифракційні решітки (інтегральні та волоконні решітки Брега з лінійно змінним кроком решітки).

#### 4.5 Особливості оцінювання інерційності ВОЛТ

В наведеному нижче алгоритмі розрахунку сумарна дисперсія сигналу в ОВ довжиною  $L$  перераховується в три етапи: в еквівалентну ширину смуги пропускання оптичного сигналу (частотна область); у відповідну ширину смуги пропускання електричного сигналу; в еквівалентний час наростання (часова область).

Алгоритм розрахунку запасу по швидкодії ВОЛТ для забезпечення (широкопasmовості) роботоздатності ВОСПІ та максимального значення довжини регенераційної ділянки для заданого значення швидкодії ВОЛТ полягає в такому.

**Крок 1.** Розрахунок необхідної ширини смуги пропускання електричного сигналу за рівнем -3 дБ ВОЛТ цифрової ОТС з тактовою частотою  $F$  та аналоговою ОТС з шириною спектра лінійного сигналу  $F_A$  виконується за такими формулами:

$$B_{\text{е.сист}} = \begin{cases} F_{\text{NRZ}} / 2 & \text{– для цифрових ОТС з NRZ - кодом,} \\ F_{\text{RZ}} & \text{– для цифрових ОТС з RZ - кодом,} \\ F_{\text{MAN}} & \text{– для цифрових ОТС з Манчестерським кодом,} \\ F_A & \text{– для аналогових ОТС.} \end{cases}$$

**Крок 2.** Необхідний час наростання фронту імпульсу (ЧНФІ) за рівнями 0,1 – 0,9 на аналоговому виході ВОЛТ визначається як

$$t_{\text{н.сист}} = \frac{0,35}{B_{\text{е.сист}}} \text{ (ГГц)}.$$

**Крок 3.** ЧНФІ на виході ЕОП  $t_{н.ЕОП}$  (нс) вибирається з бази параметрів ЕОП залежно від необхідної швидкості передавання.

**Крок 4.** ЧНФІ на виході ООП (ОВ в кабелі довжиною  $L_{ок}$  (км))  $t_{н.ООП}$  (нс), що обумовлений хроматичною та модовою складовими дисперсією.

ЧНФІ, що обумовлений хроматичною дисперсією визначається як

$$t_{н.хр} = \sigma_{хр} \cdot \Delta\lambda \cdot L_{ок} \text{ (нс)},$$

де  $\sigma_{хр}$  – питома хроматична дисперсія ОВ на робочій довжині хвилі  $\lambda$ ;

$\Delta\lambda$  – ширина спектра випромінювання ЕОП за напіввисотою.

ЧНФІ, що обумовлений модовою дисперсією  $t_{н.мод}$  (нс) розраховується в два етапи. Оптична ширина смуги пропускання, що обумовлена модовою дисперсією, визначається згідно з виразами:

$$B_{\text{мод.опт}} = \begin{cases} \frac{K_F}{L_{ок}} & \text{– для } L_{ок} < l_б, \\ \left( \sum_i \left[ \frac{K_F}{l_б} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \right)^{-\gamma} & \text{– для } L_{ок} \geq l_б, \end{cases}$$

де  $K_F$  – коефіцієнт широкосмуговості БМ ОВ;  $l_б$  – будівельна довжина ОК ( $l_б=2 - 7$  км);  $i$  – кількість будівельних довжин кабелю на ВОЛТ;  $\gamma$  – показник ступеня довжини, що вказується виробником ОК для кожного типу БМ ОВ ( $\gamma=0,5 - 0,9$ ).

Ширина смуги пропускання електричного сигналу ООП, що обумовлена модовою дисперсією визначається за формулою:

$$B_{\text{мод.ел}} = 0,71 \cdot B_{\text{мод.опт}} \text{ (ГГц)}.$$

ЧНФІ на виході ООП, що обумовлений модовою дисперсією, визначається за виразом:

$$t_{н.мод} = \frac{0,35}{B_{\text{мод.ел}}} \text{ (нс)}.$$

Тоді ЧНФІ на виході ООП буде знайдено за формулою:

$$t_{н.ООП} = \sqrt{t_{н.хр}^2 + t_{н.мод}^2} \text{ (нс)}.$$



**Крок 5.** ЧНФІ на виході ОЕП  $t_{н.ОЕП}$  (нс) вибирається з бази параметрів ОЕП залежно від необхідної швидкості передавання.

**Крок 6.** Сумарний ЧНФІ на виході ВОЛТ визначається як

$$t_{н.сум} = \sqrt{t_{н.ЕОП}^2 + t_{н.ООП}^2 + t_{н.ОЕП}^2} \text{ (нс).}$$

**Крок 7.** Зіставляємо набуте значення  $t_{н.сум}$  (нс) та значення необхідно-го часу наростання ОТС:

$$t_{н.сум} \leq t_{н.сист}.$$

Якщо нерівність не виконується, то вибрані компоненти не задовольняють системні вимоги за часом наростання і тоді потрібно вибрати іншу комбінацію компонентів ВОЛТ (ЕОП, ООП, ОЕП) з меншими значеннями часу наростання. Після чого повторити розрахунки згідно з кроками 3 – 6.

У випадку, коли нерівність виконується, тоді вибрані компоненти задовольняють системні вимоги за часом наростання і в результаті розраху-вується запас ОТС за часом наростання за формулою:

$$t_{н.зап} = \sqrt{t_{н.сист}^2 - t_{н.сум}^2} \text{ (нс).}$$

За наявності запасу і у випадку застосування ОМ ОВ можна виконати розрахунок максимально допустимої довжини ділянки регенерації за часом наростання згідно з виразом:

$$L_{р.макс} = \frac{\sqrt{t_{н.сист}^2 - t_{н.ЕОП}^2 - t_{н.ОЕП}^2}}{|\sigma_{xp}| \cdot \Delta\lambda} \text{ (км).}$$

В таблиці 4.1 наведені результати оцінювання повної дисперсії в ВОЛЗ  $D(\lambda) \cdot L$  та максимальної відстані між регенераторами (без компенсації дисперсії) для стандартних одномодових ОВ ( $D(\lambda) = 16$  пс/(нм·км) на  $\lambda = 1550$  нм).

Таблиця 4.1 – Допустимі значення повної дисперсії у ВОЛЗ

Швидкість інформаційного сигналу, Гбіт/с	Допустиме значення повної дисперсії у ВОЛЗ, пс/нм	Максимальна довжина регенераційної ділянки у ВОЛТ, км
2,5	16000	1000
10	1000	60
40	60	4

Збільшити довжину ділянки регенерації можливо шляхом компенсації повної дисперсії у ВОЛЗ.

**Приклад.** Визначити значення запасу по швидкодії ВОЛТ для забезпечення (широкосмуговості) роботоздатності ВОСП СЦІ в другому вікні прозорості з тактовою частотою  $F = 155,52$  МГц в NRZ-кодi. Визначити максимальне значення довжини регенераційної ділянки для заданого значення швидкодії ВОЛТ. Довжина оптичного кабелю з одномодовим ОВ становить 50 км. Робоча довжина хвилі 1310 нм. Значення швидкодії електро-оптичного перетворювача: час наростання ЕОП  $t_{н.еоп} = 2,0$  нс, ширина спектра випромінювання  $\Delta\lambda = 20$  нм. Значення швидкодії оптичного волокна: матеріальна дисперсія  $\sigma_m = -0,006$  нс/(нм·км), хвилеводна дисперсія  $\sigma_{хв} = 0,005$  нс/(нм·км), довжина оптичного кабелю з урахуванням запасу 1,5%  $L_{ок} = 50$  км. Значення швидкодії оптоелектричного перетворювача: час наростання  $t_{н.оеп} = 1,0$  нс.

**Крок 1.** Виберемо компоненти синхронного ВОЛТ з параметрами, згідно з завданням та перепишемо їх в таблицю.

Таблиця 4.2 – Параметри компонентів ВОЛТ рівня STM-1 на  $\lambda = 1310$  нм

Параметр	Значення
<i>Електрооптичний перетворювач – світлодіод</i>	
Час наростання ЕОП (охоплюючи процесор)	$t_{н.еоп} = 2$ нс
Ширина спектра випромінювання за напіввисотою	$\Delta\lambda = 20$ нм
<i>Оптооптичний перетворювач – стандартне одномодове ОВ (рек. G.652)</i>	
Матеріальна дисперсія	$\sigma_{мат} = -0,006$ нс/(нм·км)
Хвилеводна дисперсія	$\sigma_{хв} = 0,005$ нс/(нм·км)
Довжина ОК (з урахуванням запасу 1,5%)	$L_{ок} = 50$ км
<i>Оптоелектричний перетворювач – германієвий р-і-п-фотодіод</i>	
Час наростання (охоплюючи сигнальний процесор)	$t_{н.оеп} = 1$ нс

**Крок 2.** Визначимо смугу пропускання електричного сигналу для ОТС:

$$B_{е.сист} = \frac{F_{NRZ}}{2} = \frac{155,52}{2} = 77,76 \text{ МГц.}$$

**Крок 3.** Визначимо значення ЧНФІ на виході ОТС:

$$t_{н.сист} = \frac{0,35}{B_{е.сист}} = \frac{0,35}{0,07776} = 4,5(\text{нс}).$$

**Крок 4.** Визначимо значення ЧНФІ на виході ОМ ОВ довжиною 50 км, що обумовлений внеском матеріальної та хвильоводної складових хроматичної дисперсії. Хроматична дисперсія згідно з вихідними даними таблиці 4.2 дорівнює:

$$\sigma_{xp} = \sigma_{mat} + \sigma_{xv} = -0,006 + 0,005 = -0,001 \left( \frac{\text{нс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} \right).$$

Звідси ЧНФІ ООП, що обумовлений хроматичною дисперсією дорівнює:

$$t_{н.ООП} = |\sigma_{xp}| \cdot \Delta\lambda \cdot L_{ок} = |-0,001| \cdot 20 \cdot 50 = 1,0(\text{нс}).$$

**Крок 5.** Сумарний ЧНФІ ВОЛТ визначимо за формулою:

$$t_{н.сум} = \sqrt{t_{н.ЕОП}^2 + t_{н.ООП}^2 + t_{н.ОЕП}^2} = \sqrt{2^2 + 1^2 + 1^2} = 2,45(\text{нс}).$$

**Крок 6.** Порівнюючи отримане значення  $t_{н.сум} = 2,45(\text{нс})$  зі значенням необхідного ЧНФІ ОТС  $t_{н.сист} = 4,5(\text{нс})$ , робимо висновок, що вибрані компоненти задовольняють системні вимоги по швидкодії.

**Крок 7.** Визначимо запас ОТС за значенням ЧНФІ згідно з виразом:

$$t_{н.зап} = \sqrt{t_{н.сист}^2 - t_{н.сум}^2} = \sqrt{4,5^2 - 2,45^2} = 3,775(\text{нс}).$$

**Крок 8.** Визначимо максимально допустиму довжину ділянки регенерації ВОЛТ за ЧНФІ за формулою:

$$L_{р.макс} = \frac{\sqrt{t_{н.сист}^2 - t_{н.ЕОП}^2 - t_{н.ОЕП}^2}}{|\sigma_{xp}| \cdot \Delta\lambda} = \frac{\sqrt{4,5^2 - 2^2 - 1^2}}{|-0,001| \cdot 20} = 195,3(\text{км}).$$

Максимально допустима довжина ділянки регенерації ВОЛТ перевищує потрібну з умов завдання в декілька разів.

**Висновок.** Вибрані компоненти ВОЛТ задовольняють системні вимоги – є запас за ЧНФІ. Можна вибрати менш швидкодійочі компоненти та зменшити вартість обладнання ОТС.

## 4.6 Математичне моделювання процесів у ВОЛТ

Математичне моделювання процесів та явищ, що відбуваються в компонентах ВОСП, є важливим як при створенні системи, так і при аналізі змін її параметрів при експлуатації.

Метою моделювання є дослідження залежності показників якості системи передавання, наприклад, вірогідності помилки від характеристик та параметрів компонентів і блоків, з яких вона складається (приймально-передавальних модулів, ОВ, лінійного коду і т. п.). Накопичена на етапі моделювання інформація дає можливість виробити рекомендації щодо реалізації схемотехніки апаратури ВОСП.

На етапі проектування ОТМ параметри швидкодії її компонентів підлягають вибору (розрахунку) та повинні мати таке значення, за якого забезпечується якісна робота ВОЛТ необхідної протяжності при заданій лінійній швидкості (ширині спектра лінійного сигналу).

Оскільки у ВОСП існує обмеження дальності/якості передавання не тільки внаслідок загасання, але і в результаті дисперсії, довжину ділянки регенерації при проектуванні (моделюванні) ВОЛТ розраховують двічі (за загасанням та часом наростання) і вибирають менше з отриманих значень.

Дальність передавання у ВОЛТ обмежується двома чинниками: загасанням потужності оптичного сигналу та інерційністю компонентів ВОЛТ (приймально-передавальних пристроїв та ОВ).

Основним критерієм в оцінюванні максимальної швидкодії компонентів ВОЛТ та ВОСП в цілому є значення дисперсії оптичного сигналу, яка має розмірність часу та визначається як середньоквадратичне значення різниці тривалості імпульсів на виході  $t_2$  та вході  $t_1$  ОВ довжиною  $L$ .

Згідно з поширеними алгоритмами розрахунку сумарна швидкодія ВОЛТ довжиною  $L$  визначається в три етапи:

- визначення еквівалентної ширини смуги пропускання оптичного сигналу для оцінювання ЧНФІ системи в цілому;
- розрахунок сумарного ЧНФІ вибраних компонентів ВОЛТ (перетворювачів ЕОП, ОЕП та ОВ довжиною  $L$ );
- порівняння розрахованого та заданого значень ЧНФІ системи та вибір розрахованого значення, якщо воно є меншим за задане, чим і підтверджується правильність вибору компонентів.

У випадку, коли вибрані компоненти не забезпечують заданої широко-смуговості ВОЛТ (відсутній запас по швидкодії), виконується повторний розрахунок сумарного ЧНФІ (2 етап) з скоригованими відповідним чином параметрами компонентів ВОЛТ.

**Приклад.** Потрібно спроектувати WDM лінійний тракт довжиною 100 (км) згідно з структурною схемою, що на рисунку 4.24. По ньому необхідно передати 8 спектральних каналів кожен зі швидкістю передавання 2,488 (Гбіт/с) (STM-16). Передбачається використовувати час-

тотний план ІТУ-Т з міжканальними інтервалами 200 ГГц. Виконаємо розрахунок «бюджету потужності» та «бюджету часу наростання» ВОЛТ.

**Крок 1.** Щоб забезпечити необхідну дальність передавання, необхідно використовувати третє ВП (1550 нм) та ОП на передавальній або приймальній стороні з коефіцієнтом підсилення за потужністю 17 дБ. Одномодове ОВ на  $\lambda = 1550$  (нм) має коефіцієнт загасання 0,25 (дБ/км) (враховуючи втрати на зварних стиках будівельних довжин кабелю). Необхідний за дисперсією тип одномодового ОВ буде визначено в ході розрахунку бюджету часу наростання ВОЛТ.

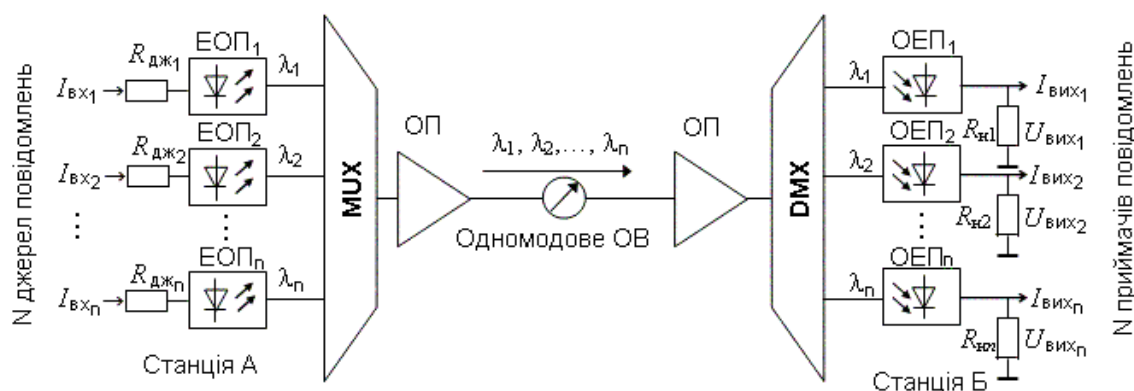


Рисунок 4.24 – Структурна схема ВОЛТ з WDM

**Крок 2.** Згідно з рекомендацією G.671 втрати, що вносяться xWDM-мультиплексором (демультиплексором) визначаються як

$$A_{\text{mux}} = A_{\text{dmux}} = 1,51 \log_2 n,$$

де  $n$  – кількість вхідних портів мультиплексора або вихідних портів демультиплексора.

Для  $n = 8$  отримуємо  $A_{\text{mux}} = A_{\text{dmux}} = 4,5$  (дБ). Прийmemo втрати потужності в оптичному фільтрі  $A_{\phi} = 1,5$  (дБ). Загальні втрати, що вносяться восьмиканальним обладнанням xWDM дорівнюють:

$$A_{\text{xWDM}} = A_{\text{mux}} + A_{\text{dmux}} + A_{\phi} = 4,5 + 4,5 + 1,5 = 10,5 \text{ (дБ)}.$$

Розрахунок бюджету потужності ВОЛТ наведено в таблиці 4.3. Висновок: енергетичні параметри компонентів забезпечують (є додатковий запас 1,1 дБ) передавання на відстань 100 км.

Таблиця 4.3 – Розрахунок бюджету потужності ВОЛТ з xWDM

Параметр	Значення	Примітка
Рівень потужності джерела випромінювання	0 дБм	Одномодовий ЛД (згідно з рек. G.957)
Рівень чутливості приймального пристрою для BER = 10 <sup>-10</sup>	-45 дБм	ПрП з р-і-n-діодом і ОпП на вході (-28 дБм - 17 дБ = -45дБм)
<i>Бюджет потужності апаратури</i>	45 дБ	0 дБм - (-45 дБм) = 45 дБ
<i>Втрати в лінії передавання:</i> Втрати у волокні і в нероз'ємних з'єднувачах будівельних довжин ОК	25,4 дБ	100 км × 1,015 × × 0,25 дБ/км = 25,4 дБ (враховуючи 1,5 % запасу на довжину ОК)
Втрати в рознімних з'єднувачах <sup>1)</sup> Втрати у WDM-обладнанні	3,0 дБ 10,5 дБ	0,5 дБ × 6 = 3,0 дБ 4,5 дБ + 4,5 дБ + + 1,5 дБ = 10,5 дБ
Експлуатаційний запас за потужністю	4,8 дБ	Згідно з рек. G.957
Загальне загасання ВОЛТ (враховуючи експлуатаційний запас)	43,7 дБ	25,4 + 3,0 + 10,5 + + 4,8 = 43,7 дБ
Надлишковий запас за потужністю	1,1 дБ	45 - 43,7=1,3 дБ
<sup>1)</sup> Рознімні оптичні з'єднувачі (6 шт.) знаходяться на: 1) виході ЛД; 2) вході WDM-мультиплексора; 3) виході WDM-мультиплексора; 4) вході волокна у WDM-демультиплексор; 5) виході WDM-демультиплексора; 6) виході оптичного фільтра (вході ОпП, який інтегрований з приймальним пристроєм).		

**Крок 3.** Для проектованого в третьому ВП ВОЛТ з xWDM довжиною 100 км потрібно вибрати компоненти та розрахувати, чи забезпечує їх швидкодія роботоздатність ОТС. Враховуючи, що всі спектральні канали рівня STM-16 працюють з тактовою частотою F = 2488 (МГц) в NRZ-кодi, вибираємо компоненти з параметрами, зведеними до таблиці 4.4.

**Крок 4.** Визначаємо ширину смуги пропускання електричного сигналу для будь-якого спектрального каналу ВОЛТ за виразом:

$$B_{e.сист} = \frac{F_{NRZ}}{2} = \frac{2488}{2} = 1244 \text{ (МГц)}$$

Таблиця 4.4 – Параметри компонентів ВОЛТ рівня STM-16 на  $\lambda = 1550$  (нм)

Параметр	Значення
<i>Електрооптичний перетворювач</i> – лазерний діод з резонатором Фабрі-Перо	
Час наростання ЕОП (охоплюючи процесор) Ширина спектра випромінювання за напіввисотою	
<i>Оптооптичний перетворювач</i> – стандартне одномодове ОВ G.652)	
Матеріальна дисперсія	$\sigma_{\text{мат}} (1550 \text{ нм}) = -0,022 \text{ нс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$
Хвильоводна дисперсія	$\sigma_{\text{хв}} (1550 \text{ нм}) = 0,022 \text{ нс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$
Довжина ОК (з урахуванням запасу 1,5 %)	$L_{\text{ок}} = 101,5 \text{ км}$
<i>Оптоелектричний перетворювач</i> – германієвий германієвий р-і-п-фотодіод	
Ширина смути пропускання за рівнем -3 дБ (охоплюючи процесор)	$\Delta f_{\text{оеп}} = 10 \text{ ГГц}$
Примітка. На вході ОЕП встановлено оптичний попередній підсилювач	Посилення за потужністю 17 дБ

**Крок 5.** Визначаємо значення ЧНФІ на виході ОТС за формулою:

$$t_{\text{н.сист}} = \frac{0,35}{B_{\text{е.сист}}} = \frac{0,35}{1,244} = 0,281 \text{ (нс)}$$

**Крок 6.** Визначимо ЧНФІ на виході ОМ ОВ довжиною 101,5 км, що обумовлений внеском матеріальної та хвильоводної складовими хроматичної дисперсії.

Хроматична дисперсія дорівнює:

$$\sigma_{\text{хр}} = \sigma_{\text{мат}} + \sigma_{\text{хв}} = -0,022 + 0,002 = -0,02 \left( \frac{\text{НС}}{\text{НМ} \cdot \text{КМ}} \right)$$

ЧНФІ ООП, обумовлений хроматичною дисперсією дорівнює:

$$t_{\text{н.ООП}} = |\sigma_{\text{хр}}| \cdot \Delta\lambda \cdot L_{\text{ок}} = |-0,02| \cdot 1 \cdot 101,5 = 2,1 \text{ (нс)}$$

**Крок 7.** Визначимо значення ЧНФІ ОЕП за формулою:

$$t_{\text{н.ОЕП}} = \frac{0,35}{f_{\text{ОЕП}}} = \frac{0,35}{10^9} = 0,035 \text{ (нс)}$$

**Крок 8.** Визначимо сумарний ЧНФІ ВОЛТ:

$$t_{\text{н.сум}} = \sqrt{t_{\text{н.ЕОП}}^2 + t_{\text{н.ООП}}^2 + t_{\text{н.ОЕП}}^2} = \sqrt{0,1^2 + 2,1^2 + 0,035^2} = 2,1 \text{ (нс)}$$

**Крок 9.** Зіставляючи отримане значення ЧНФІ ВОЛТ  $t_{н.сум} = 2,1$  (нс) зі значенням ЧНФІ згідно з вимогами завдання  $t_{н.сист} = 0,281$  (нс), робимо висновок, що вибрані компоненти не задовольняють системні вимоги за швидкодією.

В даному випадку для узгодження роботоздатності ВОЛТ можна використати такі варіанти:

А – застосування ОВ з меншим коефіцієнтом хроматичної дисперсії;

Б – використання лазерного діода з меншою шириною спектра  $\Delta\lambda_{0,5}$ ;

В – застосування компенсатора хроматичної дисперсії.

**Крок А.** Виберемо інший тип ОВ, наприклад ОВ рек. G.653 з хроматичною дисперсією 3,5пс/(нм·км) в області 1550 нм.

Для цього типу ОВ значення ЧНФІ дорівнює:

$$t_{н.ООП1} = |\sigma_{xp}| \cdot \Delta\lambda \cdot L_{ок} = |3,5| \cdot 1 \cdot 101,5 = 0,355 \text{ (нс)};$$

$$t_{н.сум1} = \sqrt{t_{н.ЕОП}^2 + t_{н.ООП}^2 + t_{н.ОЕП}^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,355^2 + 0,035^2} = 0,37 \text{ (нс)}.$$

Набуте значення  $t_{н.сум1} = 0,37$  нс  $> 0,281$  (нс), тобто системна вимога не виконується – тракт як і раніше не є роботоздатним.

**Крок Б.** Виберемо лазерний діод з розподіленням зворотним зв'язком (РЗЗ) з  $\Delta\lambda = 0,2$  (нм). Повторюючи розрахунок для другого типу ОВ (рек. G.653), отримуємо:

$$t_{н.ООП2} = |\sigma_{xp}| \cdot \Delta\lambda \cdot L_{ок} = |3,5| \cdot 0,2 \cdot 101,5 = 0,07105 \text{ (нс)};$$

$$t_{н.сум2} = \sqrt{t_{н.ЕОП}^2 + t_{н.ООП}^2 + t_{н.ОЕП}^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,07105^2 + 0,035^2} = 0,128 \text{ (нс)}.$$

Перевірка  $t_{н.сум2} = 0,128$  нс  $< 0,281$  (нс). Нерівність виконується, тобто вибрані компоненти забезпечують необхідну швидкодію.

**Крок 9.** Запас ВОЛТ за ЧНФІ для цього випадку дорівнює:

$$t_{н.зап} = \sqrt{t_{н.сист}^2 - t_{н.сум2}^2} = \sqrt{0,281^2 - 0,128^2} = 0,25 \text{ (нс)}.$$

**Крок 10.** Максимальна довжина ділянки регенерації за ЧНФІ для другого типу ОВ (рек. G.653) та ЛД з РЗЗ дорівнює:

$$L_{р.макс} = \frac{\sqrt{t_{н.сист}^2 - t_{н.ЕОП}^2 - t_{н.ОЕП}^2}}{|\sigma_{xp}| \cdot \Delta\lambda} = \frac{\sqrt{0,281^2 - 0,1^2 - 0,035^2}}{|-0,0035| \cdot 0,2} = 371,8 \text{ (км)}.$$



Застосування у ВОЛТ компенсатора дисперсії (разом з ОП, що компенсує загасання в компенсаторі) є альтернативним, проте, найбільш дорогим з розглянутих рішень.

Результати розрахунків бюджету ЧНФІ ВОЛТ наведені в таблиці 4.5.

Висновок. Вибрані на кроці Б компоненти ВОЛТ задовольняють системні вимоги за ЧНФІ з запасом 0,25 (нс). Максимально допустима довжина ділянки регенерації за ЧНФІ становить 371,8 (км).

На рисунку 4.25 подано графічну інтерпретацію «бюджету часу наростання» ВОЛТ.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку бюджету ВОЛТ за ЧНФІ

Компоненти, параметри	Позначення	Значення
Системна вимога на ЧНФІ	$t_{н\text{ сист}}$	0,281 нс
ЕОП —ЛД	$t_{еоп}$	0,1 нс
ООП ( $L_{ок} = 101,5$ км): - ОМ ОВ G.652, $\Delta\lambda = 1$ нм (ЛД Фабрі-Перо) - ОМ ОВ G.653, $\Delta\lambda = 1$ нм (ЛД Фабрі-Перо) - ОМ ОВ G.653, $\Delta\lambda = 0,2$ нм (ЛД з РЗЗ)	$t_{н\text{ ооп } 1}$ $t_{н\text{ ооп } 2}$ $t_{н\text{ ооп } 3}$	2,1 нс 0,355 нс 0,071 нс
ОЕП <sup>1)</sup> з $\Delta f_{оеп} = 10$ ГГц	$t_{н\text{ оеп}}$	0,035 нс
Час наростання ВОЛТ	$t_{сум\ 1}$	2,1 нс ( $\Delta\lambda = 1$ нм)
	$t_{сум\ 2}$	0,37 нс ( $\Delta\lambda = 1$ нм)
	$t_{сум\ 3}$	0,128 нс ( $\Delta\lambda = 0,2$ нм)
Системний (для ОВ рек. G.653 )	$t_{зап}$	0,25 нс ( $\Delta\lambda = 0,2$ нм)
Максимально допустима довжина ділянки регенерації за часом наростання	$L_{р\text{ макс}}$	371,8 км (для ОВ рек. G.653, $\Delta\lambda = 0,2$ нм)
Примітка. <sup>1)</sup> Наявність ОпП в тракті не впливає на його швидкодію.		

Якщо  $t_{н\text{ сум}} \leq t_{н\text{ сист}}$ ,  $t_{н\text{ зап}} \geq 0$  – ОТС є роботоздатною.

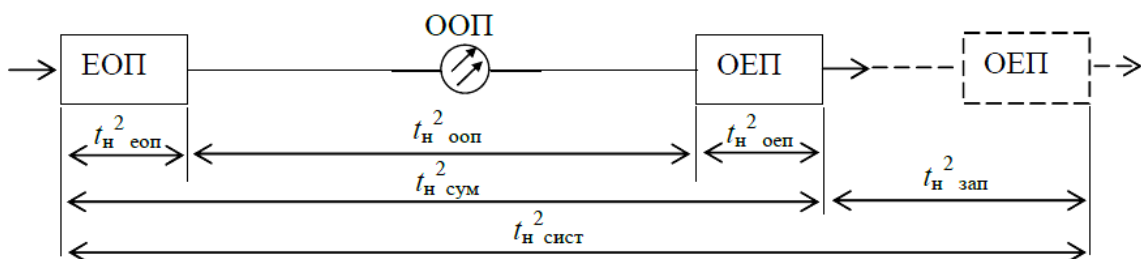


Рисунок 4.25 – Графічне подання «бюджету ЧНФІ» ВОЛТ

На рисунку 4.26 наведено меню програми розрахунку часових параметрів ВОЛТ (так званого «бюджету часу наростання»). При цьому враховується інерційність (обмеженість смуги пропускання) основних компонентів ВОЛТ.

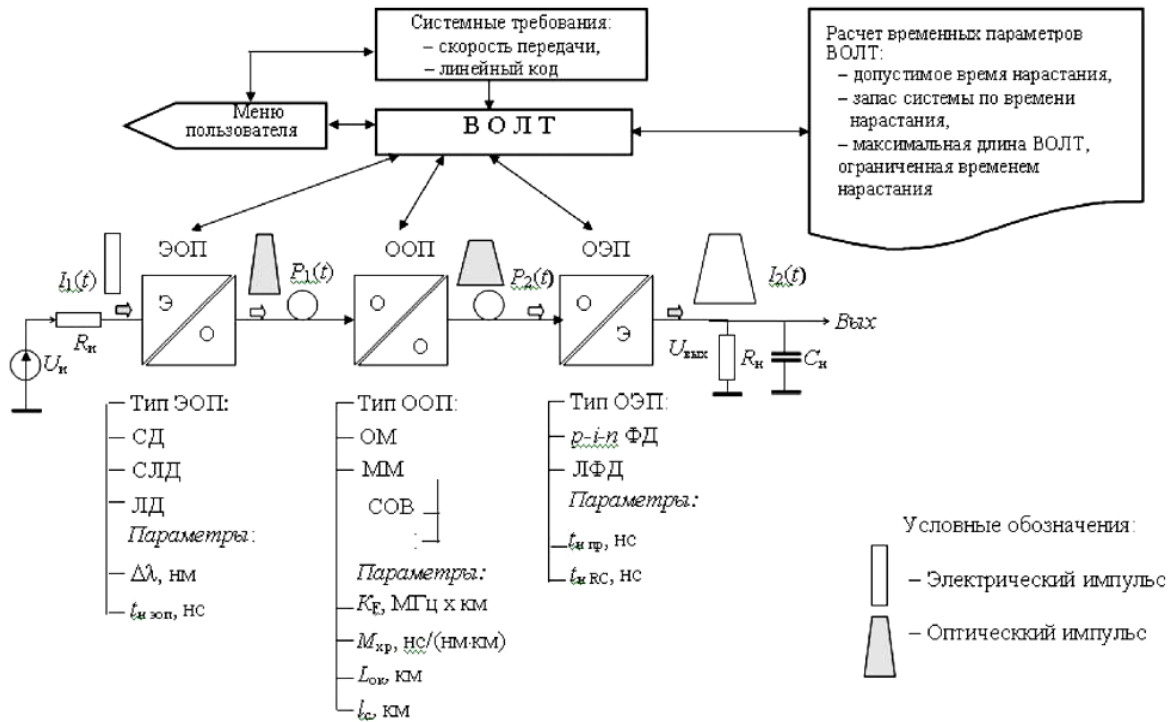


Рисунок 4.26 – Узагальнена структурна схема ВОЛТ, що відображена в меню програми «Tfotl»

Алгоритм роботи цієї програми такий:

- виконується внесення в меню програми необхідних вихідних даних (параметрів вибраних компонентів) для проведення розрахунків;
- виконується розрахунок необхідного часу наростання ВОЛТ, використовуючи максимальну робочу частоту заданого типу обладнання;
- потім розраховується сумарний час наростання ВОЛТ, яке забезпечує вибрана комбінація компонентів (ЕОП, ООП, ОЕП) та порівнюється із значенням часу наростання необхідного для нормальної роботи системи;
- якщо вибрана комбінація компонентів забезпечує менший, ніж потрібний час наростання системи, то ця комбінація підходить та розраховується запас системи передавання за часом наростання;
- за наявності запасу програма розраховує максимальну довжину ділянки регенерації, обмежену часом наростання;

- якщо вибрані компоненти не задовольняють системні вимоги за швидкістю, програма формує команду на зміну (зменшення) значення часу наростання фронту імпульсу для компонентів ВОЛТ;
- після внесення користувачем змін цикл розрахунків повторюється;
- за результатами розрахунку програма створює звіт із заданими та розрахованими параметрами швидкодії ВОЛТ.

#### 4.7 Особливості формування лінійних сигналів у ВОЛТ

Для параметрів лінійних сигналів оптичних систем передавання визначено перелік основних вимог:

- енергетичний спектр повинен мати мінімальну спектральну густину в низькочастотній області та мінімум високочастотних складових;
- лінійний сигнал повинен мати складову тактової частоти;
- основна частина енергетичного спектра має знаходитись в обмеженому діапазоні частот;
- процес лінійного кодування не повинен залежати від статистики інформаційного сигналу;
- алгоритм формування лінійного сигналу повинен забезпечувати надійний контроль помилок регенерації;
- лінійний код не повинен призводити до появи додаткових помилок.

Для формування лінійних сигналів ВОСП широко використовуються блочні коди типу  $nVmB$ , в яких  $n$  – кількість кодованих цифрових розрядів,  $B$  – значення двійкової основи системи визначення двійкового коду,  $m$  – кількість дворівневих сигналів, які передаються по ОВ.

До лінійних сигналів ВОСП висуваються такі вимоги:

- спектр сигналу має бути вузьким та обмеженим, оскільки чим вузьчий спектр сигналу, тим менша необхідна смуга пропускання фотоприймача та, відповідно, зменшується вплив потужності шуму. Обмеження спектра знижує рівень міжсимвольної завади та флуктуації рівня сигналу в фотоприймачі. Мінімальні значення низькочастотних складових забезпечують стабільну роботу схеми стабілізації вихідної потужності оптичного передавача;
- код лінійного сигналу повинен забезпечувати можливість виділення сигналу тактової частоти для забезпечення нормальної роботи схеми тактової синхронізації;
- код лінійного сигналу повинен мати максимальну завадостійкість, яка дозволить отримати при інших рівних умовах максимальну довжину ділянки регенерації ВОЛТ;

- код лінійного сигналу має бути надлишковим, що дозволить за порушенням правил утворення коду аналізувати причини виникнення помилок;
- код лінійного сигналу повинен бути простим для практичної реалізації перетворювачів коду.

Наприклад, код 1В2В означає, що вхідний блок складається з одного розряду ( $n=1$ ) та потім він передається в лінію у вигляді блока з двох розрядів ( $m=2$ ) і тому відносна швидкість передавання в лінійному тракці в два рази вища швидкості вхідних символів.

Найбільш простими лінійними кодами є МК2-коди (без повернення до нуля – NRZ) та К2-коди (з поверненням до нуля – RZ). Відмінність між ними полягає в тому, що в NRZ-коді логічна «1» передається імпульсами, а в RZ-коді – послідовністю імпульсу та паузи (рис. 4.27, а, б). Нормовані спектри цих кодів показано на рисунку 4.28. Недоліком RZ-коду, порівняно з NRZ-кодом, є необхідність використання ширшої смуги передавання через меншу тривалість імпульсів, а перевагою є зменшення ступеня деградації параметрів джерела оптичного випромінювання за рахунок меншого часу роботи. Прикладом RZ-кодів є 1В2В код, який рекомендовано до використання лише на коротких ВОЛТ без НРП.

Зменшення значення низькочастотних складових в спектрі лінійних сигналів забезпечується шляхом використання манчестерського (біфазного) коду ВІФ, в якому, за рахунок відсутності підряд більше ніж двох однакових символів, забезпечено зниження кількості низькочастотних компонентів (рис. 4.27, в). На рисунку 4.27, г показано алгоритм формування коду 2В3В:

- розряди 00 замінюються на 001;
- 01 на 010;
- 10 на 100;
- 11 на 011.

Цей код забезпечує зниження швидкості інформаційного потоку порівняно з 1В2В-кодом.

Недоліками вищерозглянутих лінійних кодів є низька завадостійкість, складність алгоритму виділення тактової частоти та складність алгоритму корекції помилок.

Тому ці лінійні коди можуть використовуватись лише на коротких ВОЛТ. Для усунення вказаних недоліків лінійних кодів вводять кореляційні зв'язки між амплітудами дворівневих сигналів. Прикладом сигналів з кореляційними зв'язками є код СМІ (код з почерговою інверсією імпульсів). На рисунку 4.27, д та 4.28 показані часова діаграма та енергетичний спектр цього коду. Введення кореляційних зв'язків дозволяє коригувати помилки при чергуванні комбінацій 11 та 00 при передаванні подвійної 1.

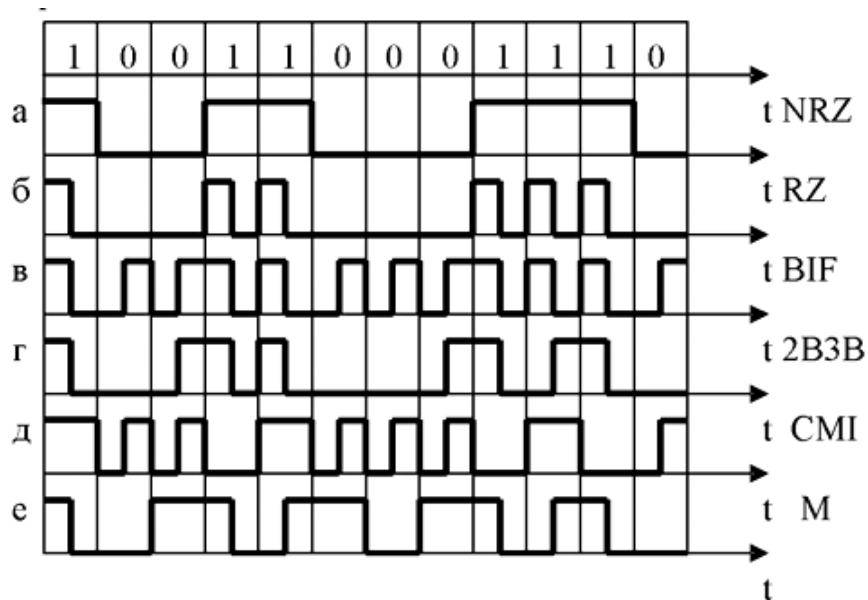


Рисунок 4.27 – Часові діаграми формування лінійних кодів ОТС

Одним з різновидів лінійних сигналів 1B2B є код Міллера (M), в якому кодова послілка 0 заміщається кодовою послілкою 11 або 00, а кодова послілка 1 – на 01 або 10, причому послідовність нулів заміщається чергуванням кодових слів 11 або 00. В інших випадках комбінацій бінарного сигналу перша послілка наступного кодового слова повторює останню послілку попереднього кодового слова (рис. 4.27, е та рис. 4.28).

Тому, перспективними кодами для цифрових ВОСПІ є дворівневі коди: 1B2B, 2B3B, 5B6B та M51P, де символ 1P означає додавання однієї балансної послілки до M бінарних (таким чином, щоб кількість одиниць та нулів в кодовому слові завжди була парною або непарною).

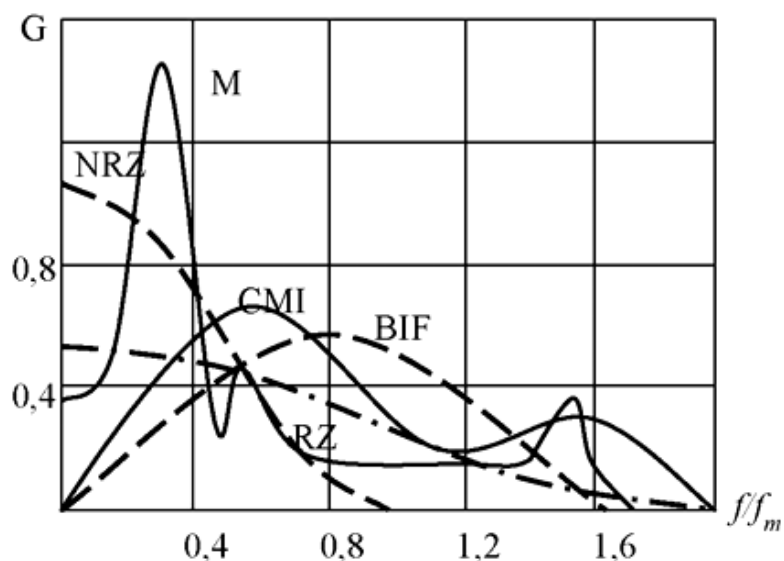


Рисунок 4.28 – Нормовані спектри лінійних кодів ВОСПІ

В цифрових ВОСПІ першого рівня ІКМ-ієрархії використовується лінійний код СМІ, для другого рівня – код СМІ або ВІF, для третього рівня – код ВІF або Міллера та для вищих рівнів – код Міллера або скребльований бінарний код в форматі NRZ.

Багаторівневі коди порівняно з дворівневими на міських, зонавих та магістральних мережах призводять до зниження енергетичного потенціалу систем на 15 – 20 дБ, тому їх переважно використовують на внутрішньозонових лініях спеціального призначення.

**Приклад.** Необхідно визначити максимальну довжину регенераційної ділянки ВОЛТ в смузі робочих частот ОТС типу ОТГ-35М. Вихідні дані: лінійна швидкість передавання ОТС становить  $V = 34,3$  (Мбіт/с), тип лінійного коду 5В6В, коефіцієнт широкосмуговості ОВ дорівнює  $\Delta f_{\text{км}} = 500$  (МГц·км).

**Крок 1.** Визначимо тактову частоту лінійного сигналу для заданого обладнання за формулою:

$$f_T = V \cdot \frac{6}{5} = 34,368 \cdot \frac{6}{5} = 41,2416 \text{ (МГц)}.$$

**Крок 2.** Визначимо максимальну довжину регенераційної ділянки ВОЛТ без ОП за виразом:

$$L_{\text{макс}} = 3 \cdot \left( \frac{\Delta f_{\text{км}}}{f_T} \right)^{0,7} = 3 \cdot \left( \frac{500}{41,2416} \right)^{0,7} = 106 \text{ (км)}.$$

При виборі типу лінійного коду для ВОСПІ необхідно враховувати параметри середовища передавання (ВОЛЗ) та кінцевих пристроїв (оптичних передавачів та приймачів). Згідно з рекомендацією G.703 для ПЦІ Е1, Е2 та Е3 в основному використовується трирівневий код HDB3 або аналогічний йому АМІ. При передаванні цих двополярних кодів по ОВ на одній довжині хвилі відбувається їх перетворення в однополярний сигнал з постійною складовою (рис. 4.29).

Оскільки, наявність постійної складової в оптичному сигналі при використанні HDB3-коду призводить до зниження потенціалу системи через зменшення відношення сигнал/шум, цей код використовується в ВОСПІ як стиковий. Цей недолік використання коду HDB3 усувається за рахунок використання методу хвилевого кодування (двоххвилевого передавання інформаційного сигналу) (рис. 4.29).

В сучасних ВОСПІ ПЦІ (Е1, Е2 та Е3), в основному, використовуються лінійні коди СМІ та МСМІ з оптимізованими параметри та відсутністю постійної складової за рахунок двократного збільшення тактової частоти і смуги частот ВОЛТ. У ВОСПІ ПЦІ Е4 використовуються лінійні коди таких типів: 5В6В, 10В1Р1R та ін.

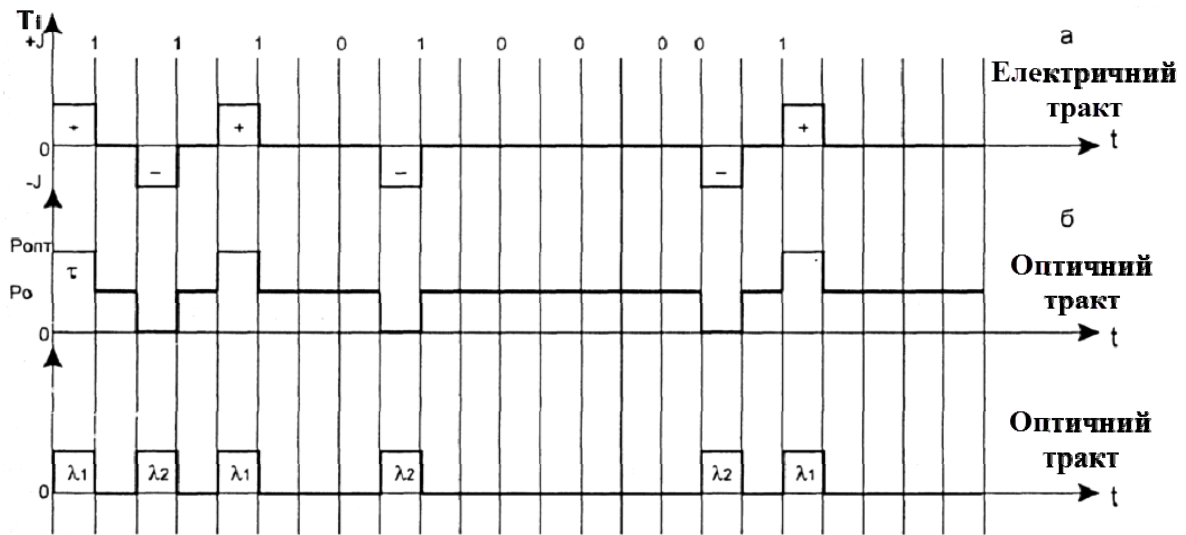


Рисунок 4.29 – Часові діаграми реалізації імпульсного коду HDB3

Узагальнену структурну схему простого ВОЛТ, що пояснює умови використання лінійних кодів показано на рисунку 4.30.

За цим принципом побудовані не лише ВОСПІ першого покоління (ПЦІ Е1, Е2 та Е3), а також будуються локальні оптичні мережі.

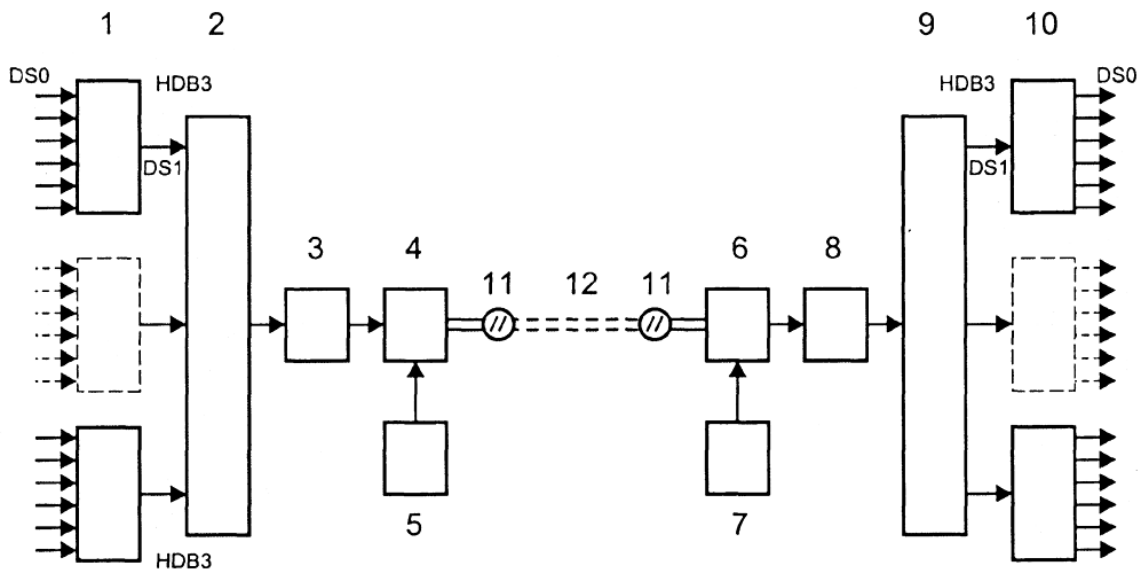


Рисунок 4.30 – Узагальнена структурна схема ВОЛТ, що пояснює особливості використання імпульсного коду HDB3

- 1)– перетворювачі (мультиплексори) основних інформаційних потоків рівня DS0 в інформаційний потік рівня DS1 в коді HDB3;
- 2)– перетворювач (мультиплексор) стикового коду HDB3 в лінійний код;
- 3)– блок узгодження (накачування) оптичного генератора 4 з виходом перетворювача коду 3;

- 4) – генератор оптичного сигналу (лазер);
- 5) – блок стабілізації вихідної оптичної потужності генератора 4 та стабілізації температури;
- 6) – фотодетектор;
- 7) – джерело напруги зміщення для фотодетектора;
- 8) – ширококутовий підсилювач електричного сигналу з фотодетектора;
- 9) – перетворювач лінійного коду в коди DS1 та демультимплексор;
- 10) – перетворювачі (демультимплексори) сигналів з коду рівня DS1 в сигнали рівня DS0;
- 11) – оптичні роз’єми;
- 12) – оптичний кабель.

#### 4.8 Формування та використання лінійних кодів ОТС

Лінійні коди ВОСПІ класифікуються за критеріями, що вказані в рекомендації ITU-T, та умовами їх використання в ОТС, на основі яких будуються ОТМ PDH, й SDH-ієрархій та оптичної Ethernet-мережі. На рисунку 4.31 показано класифікацію лінійних кодів ВОСПІ.

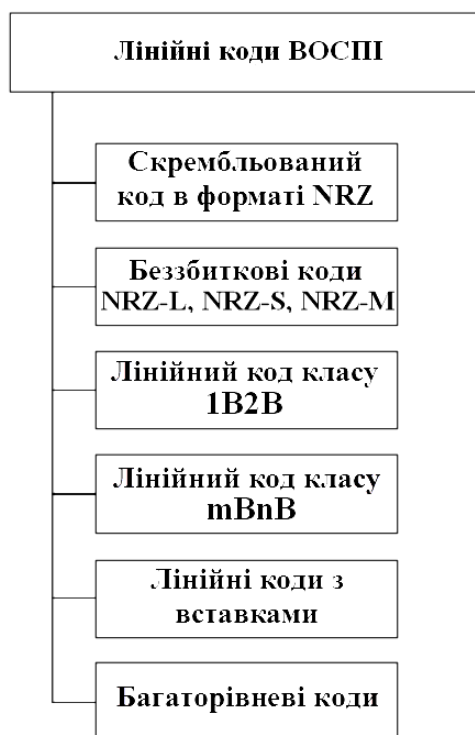


Рисунок 4.31 – Класифікація лінійних кодів цифрових ВОСПІ

Лінійні коди, а саме: скрембльований, коди безбитковості, код 1B2B, блочні коди mBnB та коди з вставками, дворівневі коди мають два логічних стани – високий та низький рівні оптичної потужності.



Скрембльований код в форматі NRZ (без повернення до нуля на тактовому інтервалі) є основним лінійним кодом цифрових ВОСПІ СЦІ. Алгоритм його формування розглянуто в рекомендації G.707.

Оскільки, в лінійних кодах класу 1B2B один біт вихідного сигналу перетворюється в комбінацію з двох бітів, тактова частота таких сигналів та їх лінійна швидкість передавання подвоюється відносно вхідного сигналу. До лінійних кодів класу 1B2B належать:

- BI-L (бімпульсний абсолютний);
- BI-M (бімпульсний відносний M);
- BI-S (бімпульсний відносний S);
- DBI (диференціальний біфазний);
- CMI (з інверсією груп символів);
- MCMI (модифікований CMI) та ін.

Лінійні коди класу mBnB (блочні коди) можуть мати постійну або змінну довжину. В основному у ВОСПІ використовуються блочні коди постійної довжини, в яких  $n=m+1$ . Алгоритм формування цих кодів базується на кодових таблицях (алфавітах) з перевіркою на парність або за допомогою зважувального кодування і тому їх ще називають табличними або алфавітними.

Кодові слова в цих кодах вибираються та групуються таким чином, щоб зменшити поточну диспаратність, максимальну кількість послідовних однакових символів, спектральну густину неперервної частини енергетичного спектра сигналу в області низьких частот.

Кращим варіантом лінійних кодів для високошвидкісних ВОСПІ є коди з вставками (mB1C). Алгоритм їх формування полягає у введенні одного додаткового інверсного біта (C-біт) після кожного блока з m-біт з метою розривання довгих послідовностей одиниць або нулів. На рисунку 4.32 показано алгоритм формування лінійного коду з вставками 5B1C.

При використанні цього коду досягається найменша лінійна швидкість інформаційного сигналу та спрощений процес виділення тактової частоти з лінійного сигналу.

Багаторівневі коди використовуються в ОТС при зовнішній модуляції оптичного сигналу з лінійними модуляційними характеристиками. Критеріями оцінювання параметрів лінійних кодів ВОСПІ є:

- надлишковість лінійного коду дворівневого сигналу  $R = 1 - \frac{m}{n}$ , що визначає параметри лінійного сигналу та значення тактової частоти  $f_{T,л} = \frac{m}{n} f_T$ ;
- відносна швидкість передавання, що вказує на коефіцієнт зміни лінійної швидкості інформаційного сигналу  $K = \frac{n}{m}$ ;

- максимальна кількість послідовних однакових символів, що визначає алгоритм виділення тактової частоти з лінійного сигналу;
- диспаратетність – нерівність кількості одиниць та нулів в кодових комбінаціях, яка характеризує тактовий синхронізм;
- ширина робочої смуги частот (90 % енергії імпульсу лінійного коду), яка визначає значення неперервної частини енергетичного спектра на тактовому інтервалі;
- цифрова сума (сума амплітуд імпульсів на часовому інтервалі), що дозволяє контролювати помилки в лінійному коді.

### Інформаційна послідовність

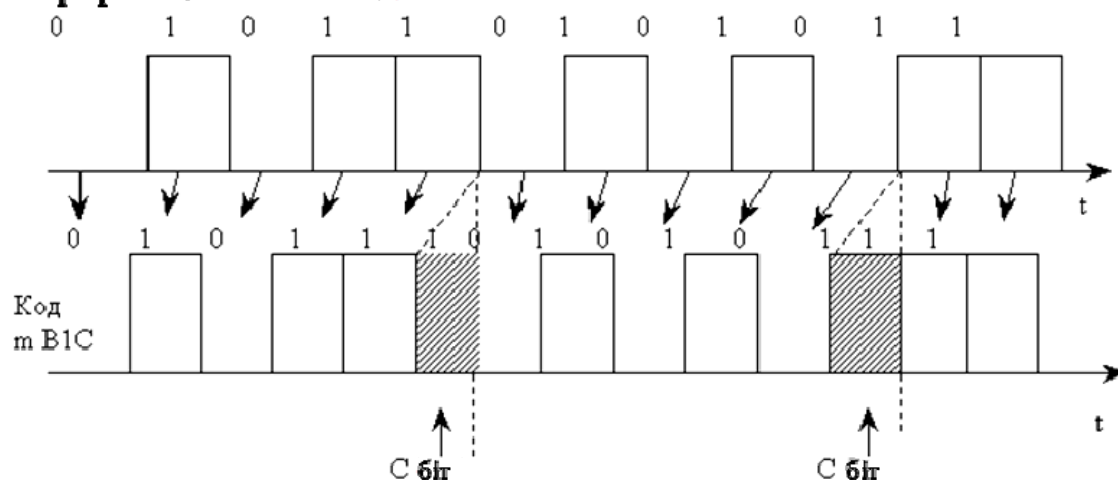


Рисунок 4.32 – Приклад формування лінійного коду 5B1C

Враховуючи випадковий характер інформаційного цифрового сигналу, для уникнення збоїв в роботі системи тактової синхронізації через довгі серії повторюваних символів в оптичних каналах виконують спеціальне перетворення лінійних сигналів на передаванні (скремблювання).

Параметри основних типів псевдовипадкових послідовностей (ПВП) наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Параметри ПВП

Кількість розрядів регістру	$n$	7	16
Період повторення ПВП	$T_n = (2^n - 1) \cdot T$	127	65535
Кількість «1» за період	$2^{n-1}$	64	32768
Кількість «0» за період	$2^{n-1} - 1$	63	32767
Ймовірність присутності «1» на тактовому інтервалі $T$	$p_1 = 2^{n-1} / (2^n - 1)$	0,504	0,5
Ймовірність присутності «1» на тактовому інтервалі $T$	$P_0 = (2^{n-1} - 1) / (2^n - 1)$	0,496	0,5

Процес скремблювання здійснюється шляхом підмішування в інформаційний цифровий сигнал псевдовипадкової послідовності максимальної довжини, яка формується в генераторі псевдовипадкової послідовності скремблера.

При скремблюванні енергія сигналу рівномірно розподіляється по робочому діапазоні частот за рахунок чого забезпечується більш стабільна робота системи тактової синхронізації.

На рисунку 4.33 наведено приклад, що пояснює принцип перетворення сигналів в скремблері та дескремблері.

В скремблері утворюється лінійний сигнал шляхом сумування за модулем 2 вхідного інформаційного сигналу  $S_{ВХ}$  та сигналу псевдовипадкової послідовності  $S_{ПВП}$ . При цьому вихідний лінійний сигнал  $S_{ВНХ}$  зберігає властивості псевдовипадкового сигналу та називається скрембльованим. В дескремблері виконується відновлення первинної структури інформаційного цифрового сигналу.

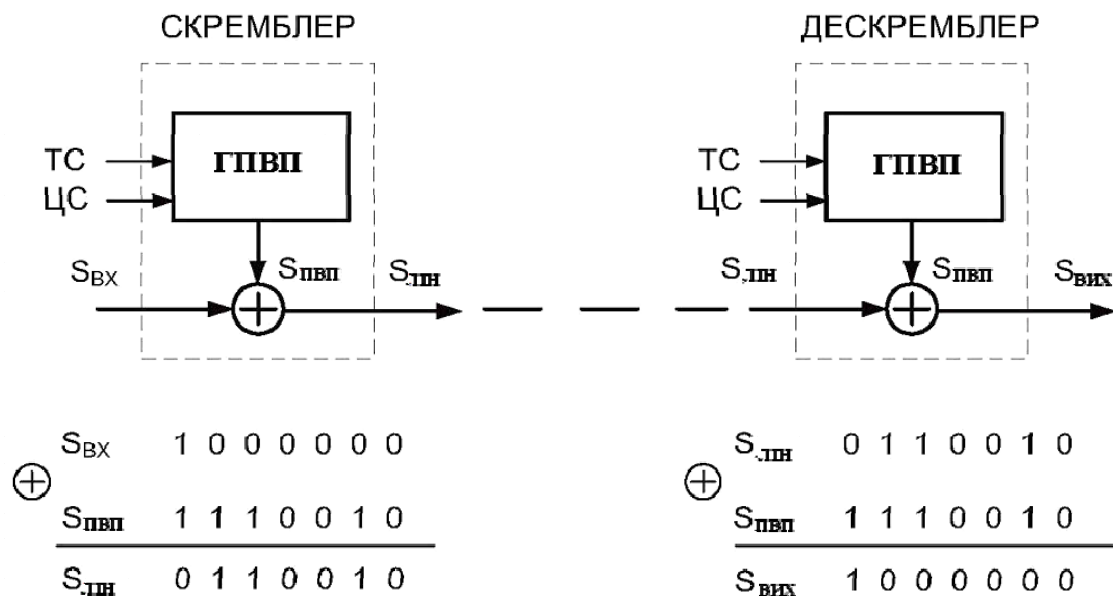


Рисунок 4.33 – Приклад скремблювання та дескремблювання цифрового сигналу

В скремблерах та дескремблерах обладнання OTN використовуються синхронні циклові генератори псевдовипадкових послідовностей, що побудовані на основі регістру зсуву зі зворотним зв'язком відповідно до (генераторного) полінома:  $1 + X + X^3 + X^{12} + X^{16}$ .

При виборі полінома необхідно враховувати такі фактори: забезпечення необхідних параметрів псевдовипадкового сигналу та простота апаратної реалізації.

На рисунку 4.34 відображено структурну схему синхронного по циклах скремблера.

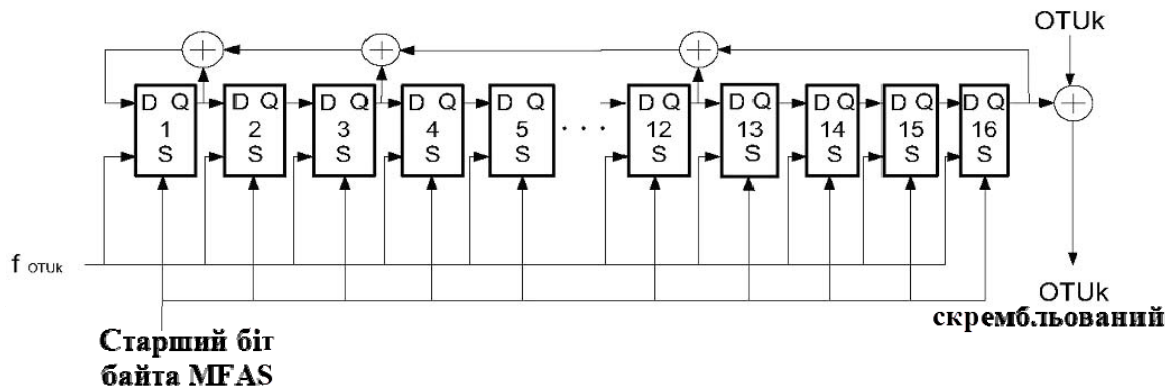


Рисунок 4.34 – Структурна схема синхронного по циклах скремблера

Тактова синхронізація цього скремблера здійснюється за допомогою сигналу тактової частоти OTUk, а циклова синхронізація виконується бітом старшого розряду сигналу надциклової синхронізації MFAS. Цей біт встановлює всі розряди регістру в одиничний стан «FFFF». Скремблювання виконується по всьому циклу OTUk за винятком сигналу циклової синхронізації (FAS) та після визначення перевірочних символів коду з виправленням помилок та введення їх в заголовок OTUk FEC.

Основними перевагами скремблюваного оптичного сигналу є стабільність лінійної швидкості інформаційного сигналу, висока точність виділення тактової частоти для НРПІ та зменшення впливу параметрів інформаційного сигналу на фазове дрижання лінійного сигналу.

Широке поширення кодів класу 1B2B зумовлено їх простотою формування та параметрами. Серед них найбільшого використання набули:

- VI-L (абсолютний бімпульсний);
- VI-M (біфазний відносно одиниці);
- VI-S (біфазний відносно нуля);
- DBI (диференціальний біфазний);
- CMI (з інверсією груп символів);
- MCMI (модифікований CMI).

Алгоритми формування цих кодів наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Алгоритми формування кодів класу 1B2B

Тип коду	VI-L		DBI		VI-M		VI-S		CMI	
	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1B	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2B	01	10	01	альтер-	01	11	00	01	11	
				натива	10	00	11	10	00	01

Код MCMI забезпечує перетворення сигналу в кодї HDB3 в бімпульсний згідно з правилами, які наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Алгоритм перетворення HDB3 в MCM1

HDB-3	-1	0	+1
MCM1	00	01	11

Часові діаграми формування лінійних оптичних сигналів в кодах класу 1B2B показано на рисунку 4.35.

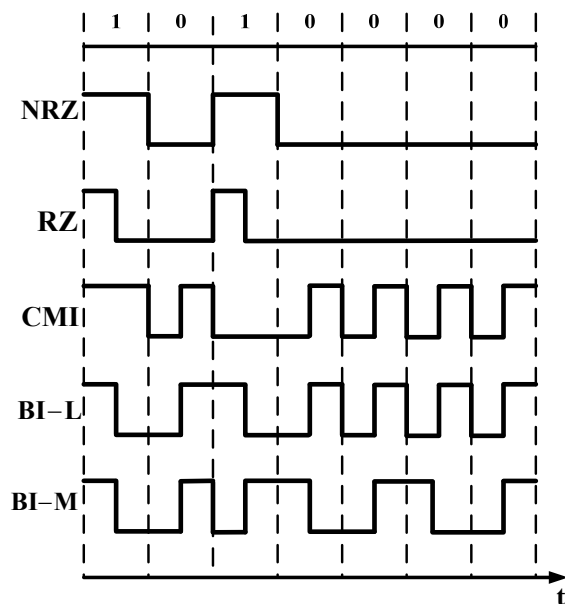


Рисунок 4.35 – Часові діаграми формування лінійних оптичних сигналів у кодах класу 1B2B

На рисунку 4.36 показано спектральні характеристики сигналів в кодах класу 1B2B.

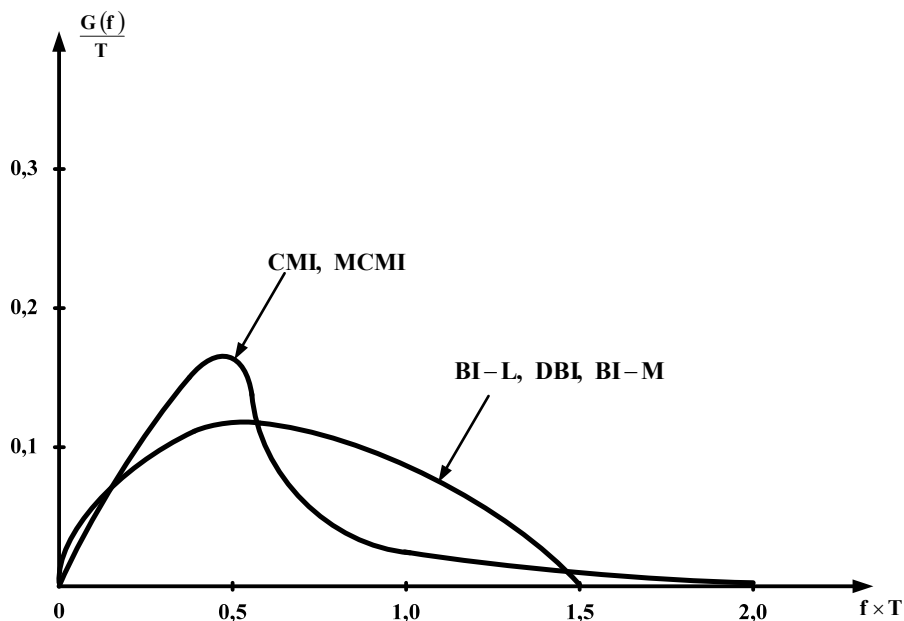


Рисунок 4.36 – Енергетичні спектри лінійних кодів класу 1B2B

Перевагами кодів класу 1B2B є: мала кількість послідовностей однакових символів, прості схеми кодерів/декодерів, забезпечення підвищеної збалансованості та стійкості системи тактової синхронізації. Недоліком цих кодів є подвійне збільшення лінійної швидкості оптичного сигналу та відповідно розширення смуги частот інформаційного сигналу.

Блочні коди класу nVmB можуть мати постійну або змінну довжину блоків. У ВОСПІ в основному використовуються коди з постійною довжиною блоків та формуються за відповідними таблицями – алфавітами, згідно з прикладами, що в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Алгоритм формування блочного коду 3B4B

Блок 3В	Блок 4В					
	Алфавіт 1			Алфавіт 2		
	+D	0	-D	+D	0	-D
000		0101		1011		0100
001		1001			0011	
010	1110		0100		0101	
011	1101		1000		0110	
100	0111		0010		1001	
101	1011		0001		1010	
110		0110			1100	
111		1010		1101		0010

Інший тип блочного кодування зображено на рисунку 4.37.

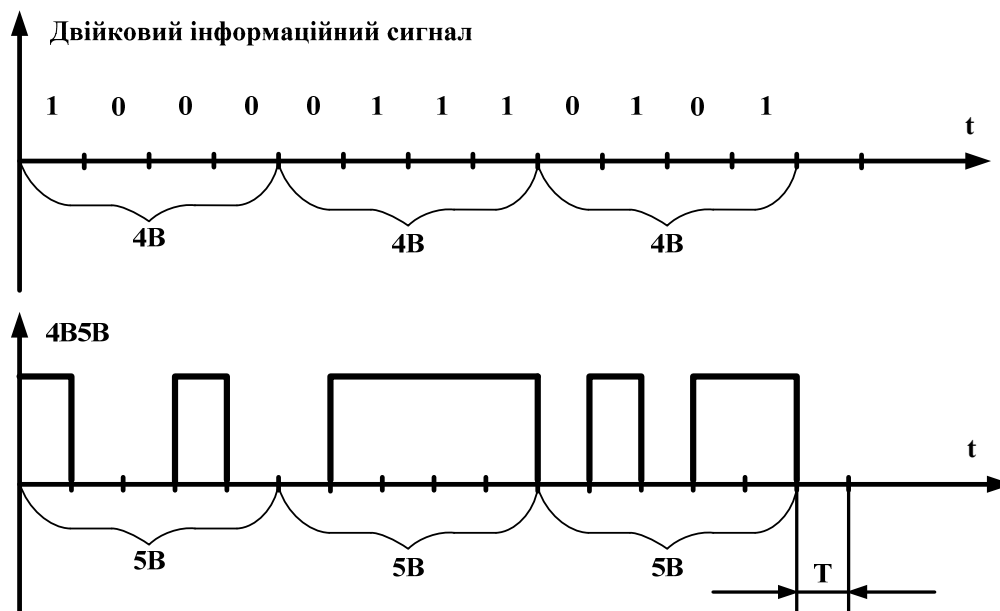


Рисунок 4.37 – Часові діаграми формування сигналу типу 4B5B-NRZ

Наведений приклад пояснює принцип зваженого кодування з перевіркою на парність та різними алфавітами. При зваженому кодуванні всі комбінації з  $m$  символів (в прикладі  $m=3$ ) вихідного двійкового коду загальним числом  $2^m$  (в прикладі  $2^3=8$ ) розбиваються на дві групи. В кожній комбінації кожної групи вибирається  $n > m$  (в прикладі  $n=m+1$ ) таким, щоб на першу групу припадало  $n$  одиниць (в прикладі диспаритет  $D=0$  для 0101, 1001, 0110, 1010), а  $n$  комбінації другої групи кодуються по чергово в блоки з нерівними кількостями одиниць та нулів (в прикладі 1110 та 0100). Як видно з таблиці 4.9, деякі блоки взагалі не входять до алфавітів (в прикладі 0000 та 1111).

Збалансоване блочне кодування лінійного сигналу забезпечує підвищену стійкість роботи системи тактової синхронізації приймача, виявлення помилок при визначенні цифрової суми, незначне збільшення тактової частоти порівняно з кодом 1В2В. Енергія неперервної складової сигналу в кодах nВmВ зосереджена у вузькому діапазоні частот та не має постійної складової. Приклад енергетичного спектра коду 5В6В наведено на рисунку 4.38. Потрібно відмітити, що параметри кодів з вставками схожі на параметри кодів nВmВ.

Корекція помилок FEC набула широкого використання в обладнанні ОТС останнього покоління та передбачена стандартами для ОТС СЦІ, ОТІ та Ethernet.

Для визначення та виправлення помилок в основному використовуються циклічні блочні коди, а саме: коди Хеммінга, коди Боуза-Чоундхурі-Хоквенгема (БХЧ) та коди Ріда-Соломона (RS).

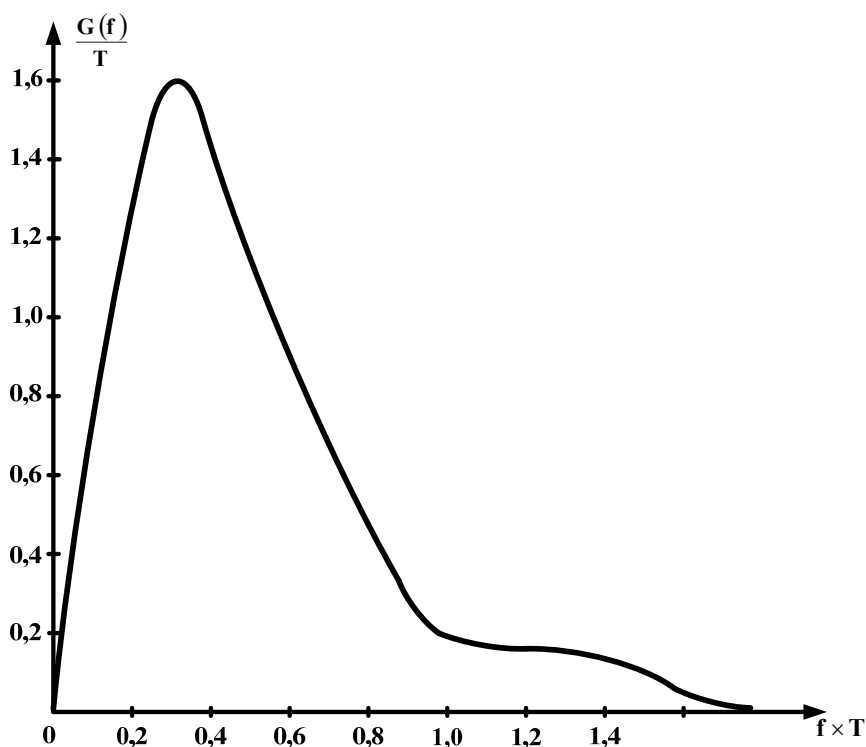


Рисунок 4.38 – Спектральна характеристика коду 5В6В

На практиці найбільшого використання набули коди Ріда-Соломона. При їх використанні дані обробляються порціями по  $m$ -біт, що називаються символами. Код  $RS(n, k)$  характеризується параметрами:

- довжина символу дорівнює  $m$  біт;
- довжина блока з  $n = (2^m - 1)$  символів дорівнює  $m(2^m - 1)$  біт;
- довжина блока даних дорівнює  $k$  символів;
- $n - k = 2t$  символів дорівнює  $m(2t)$  біт;
- мінімальна відстань Хеммінга дорівнює  $d_{\min} = 2t + 1$ ;
- кількість помилок, що необхідно виправити дорівнює  $t$ .

Алгоритм кодування  $RS(n, k)$  базується на розширенні блока  $k$  символів до розміру  $n$ , шляхом додавання  $(n-k)$  збиткових контрольних символів. Оскільки, довжина символу дорівнює степеню двійки, широко використовується значення  $m=8$ , тобто символ дорівнює одному байту.

Для коригування помилок використовується 16-символьний код ( $RS-255, 239$ ), який належить до класу лінійних циклічних блочних кодів.

В таблиці 4.10 наведено значення коефіцієнтів помилок на виході декодера FEC ( $RS-255, 239$ ).

Таблиця 4.10 – Значення коефіцієнтів помилок на виході декодера FEC ( $RS-255, 239$ )

Коефіцієнт помилок на вході	Коефіцієнт помилок на виході
$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-15}$
$10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-24}$
$10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-33}$

Принцип дії цього коду полягає в такому:

- кожний цикл передавання (наприклад, STM-N або OTUk) розбивається на блоки з символів даних довжиною по 239 байт. Кожному такому блоку визначається контрольний блок з 16 символів (байт) та приєднується до 239 байтів (240 – 255 байти). Об'єднаний блок  $k$  з блоком  $n-k$  утворюють стрічку циклу. Синхронне побайтове мультиплексування цих стрічок утворює одну циклову стрічку. При формуванні блока  $n-k$  блок даних  $k$  зсувається на  $n-k$  та ділиться на поліном  $P = X^8 + X^4 + X^3 + X^2 + 1$ . В результаті блок даних  $k$  та залишок від ділення об'єднуються та утворюють підстрічку. Після її передавання на приймальній стороні виконується ділення її на поліном  $P$  і у випадку, якщо залишок дорівнює нулю, це означає, що передавання пройшло без помилок. В іншому випадку – місце помилки в блоці  $k$  визначається за залишком (наприклад, табличним методом). Завдяки тому, що код ( $RS-255, 239$ ) має відстань Хеммінга  $d_{\min} = 17$ , ним можна коригувати до 8 символівних помилок.

Потрібно відмітити, що ефективність  $RS(255, 239)$  кодування може становити від 5 до 8 дБ.



## Контрольні завдання

1. Вкажіть типи та графічно поясніть основні принципи побудови ВОЛТ.
2. Вкажіть вимоги, що висуваються до лінійних трактів систем із спектральним ущільненням.
3. Поясніть необхідність математичного моделювання процесів у ВОСП.
4. Поясніть необхідність оцінювання швидкодії компонентів ВОСП.
5. Поясніть алгоритм роботи програми розрахунку параметрів інерційності ВОЛТ.
6. Поясніть призначення та умови використання транспондерів.
7. Поясніть причини обмеження довжини регенераційної ділянки ВОЛТ та вкажіть методи її збільшення.
8. Вкажіть та поясніть (графічно) відмінності між структурами однохвильових та багатохвильових ВОЛТ.
9. Поясніть необхідність регенерування сигналів у ВОСП.
10. Поясніть призначення та принцип дії оптичних регенераторів.
11. Вкажіть типи оптичних ретрансляторів та хвильових конвертерів і поясніть їх призначення.
12. Поясніть призначення та різницю між 1R-, 2R-, 3R-ретрансляторами.
13. Поясніть необхідність компенсації дисперсії у ВОЛЗ.
14. Поясніть принципи побудови та вкажіть переваги і недоліки волоконних розподілених компенсаторів дисперсії.
15. Вкажіть типи та поясніть вимоги, які висуваються до кодів, що використовуються у ВОСП.
16. Вкажіть типи та умови використання лінійних кодів в системах ВОЛЗ ПЦ.
17. Поясніть необхідність та принцип формування скрембльованого лінійного сигналу.
18. Вкажіть типи лінійних сигналів в класі кодів nVmV та поясніть принцип їх формування і умови використання.
19. Вкажіть необхідність, методи корекції помилок в оптичних системах передавання та поясніть принцип формування циклічних блочних кодів з функцією корекції помилок.
20. Вкажіть найефективніші типи лінійних кодів для ВОСП та поясніть свій вибір.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бортник Г. Г. Системи доступу : підручник для вузів / Бортник Г. Г., Кичак В. М., Стальченко О. В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. – 308 с.
2. Бортник Г. Г. Телекомунікаційні системи передавання : навчальний посібник / Бортник Г. Г., Кичак В. М., Пунченко Н. О., Стальченко О. В. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 145 с.
3. Бакланов И. Г. NGN: принципы построения и организации / Бакланов И. Г. – М. : Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
4. Бірюков М. Л. Транспортні мережі телекомунікацій. Системи мультиплексування. : підручник / М. Л. Бірюков, В. К. Стеклов ; під ред. В. К. Стеклова. – К. : Техніка, 2005. – 312 с.
5. Гордиенко В. Н. Оптические телекоммуникационные системы : учебник для вузов / Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В., Моченов А. Д. ; под ред. В. Н. Гордиенко. – М. : Телеком, 2011. – 368 с.
6. Дэвид Бейли. Волоконная оптика: теория и практика / Дэвид Бейли, Эдвин Райт. – М. : КУДИЦ-ОБРАЗ, 2006. – 320 с.
7. Зингеренко Ю. А. Оптические цифровые телекоммуникационные системы и сети синхронной цифровой иерархии : учебное пособие / Зингеренко Ю. А. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 393 с.
8. Корнейчук В. И. Волоконно-оптические измерения / В. И. Корнейчук, И. П. Лесовой. – К. : Наукова думка, 2002. – 323 с.
9. Родина О. В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство / Родина О. В. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 400 с.
10. Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / Семенов А. Б. – М. : ДМК Пресс, 2006. – 632 с.
11. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учебное пособие / Скляр О. К. – СПб. : «Лань», 2010. – 272 с.
12. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / [сборник статей под редакцией С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова]. – М. : Техносфера, 2010. – 608 с.
13. Справочник по телекоммуникационным технологиям ; [пер. с англ.]. – М. : Изд. Дом «Вильямс», 2004. – 440 с.
14. Соломенчук В. Д. Оптические транспортные сети / Соломенчук В. Д., Мищенко В. А., Гура К. Н. – К. : ЦПО, 2014. – 294 с.
15. Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети / Фокин В. Г. – М. : Эко-Трендз, 2008. – 288 с.
16. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Фриман Р. – М. : Техносфера, 2006. – 496 с.
17. Цуканов В. Н. Волоконно-оптическая техника: практическое руководство / В. Н. Цуканов, М. Я. Яковлев. – М. : Инфа-Инженерия, 2014. – 304 с.

*Навчальне видання*

**Бортник Геннадій Григорович  
Васильківський Микола Володимирович  
Кичак Василь Мартинович**

**ТРАНСПОРТНІ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ**

Навчальний посібник

Редактор Є. Плетньова

Оригінал-макет підготовлено М. Васильківським

Підписано до друку 10.05.2017 р..  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 9,36  
Наклад 50 пр. Зам. № 2017-083

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, 21021.  
Тел. (0432) 59-85-32, 59-81-59,  
**press.vntu.edu.ua**,  
*E-mail: kivc.vntu@gmail.com.*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.