

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем  
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Лариса ГЛОБА

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні  
технології»**

**спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**на тему: «Способи модернізації телекомунікаційних систем на основі  
NG-PON2»**

Виконавля:

студентка ІV курсу, групи ТІ-62

Данильченко Вікторія Олександрівна \_\_\_\_\_

Керівник:

доцент кафедри ІТМ ІТС, к.т.н.

Кононова Ірина Віталіївна \_\_\_\_\_

Рецензент:

старший викладач викладач кафедри ТС ІТС,

Вакуленко Олександр Володимирович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інститут телекомунікаційних систем**  
**Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Лариса ГЛОБА

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Данильченко Вікторії Олександрівни**

1. Тема роботи «Способи модернізації телекомунікаційних систем на основі NG-PON2», керівник роботи Кононова Ірина Віталіївна, доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж ІТС, к.т.н., затверджені наказом по університету від «30» березня 2020 р. № 924-с

2. Термін подання студентом роботи 8 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи

Пряма модуляція RSOA

Архітектура WDM-PON

4. Зміст роботи

Еволюція оптичних мереж

Аналіз активних та пасивних оптичних мереж

Способи модернізації NG-PON2

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Еволюція та впровадження новітніх технологій пасивних оптичних мереж

Варіанти архітектури мережі PON та NG-PON

Комбіновані оптичні мережі з використанням WDM

Варіант застосування RSOA-FCL у мережі WDM

Моделювання RSOA

6. Дата видачі завдання 20.09.2019

---

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення зі змістом, ознайомлення з науковою літературою	20.09.2019	виконано
2	Аналіз існуючих технологій, збір інформації	02.01.2020	виконано
3	Написання першого розділу	25.02.2020	виконано
4	Вибір методу мультиплексування для модернізації мережі	27.03.2020	виконано
5	Написання другого розділу	01.05.2020	виконано
6	Написання третього розділу	03.06.2020	виконано
7	Оформлення роботи, підготовка до презентації	09.06.2020	виконано

Студент

Вікторія ДАНИЛЬЧЕНКО

Керівник

Ірина КОНОНОВА

## РЕФЕРАТ

У дипломній роботі проаналізовано розвиток пасивних мереж та їх сучасний стан. Визначені відмінності стандартів та прийняте рішення щодо запровадження оптичних пасивних мереж наступного покоління NG-PON2. На основі проведеного аналізу методів побудови пасивних мереж обрана топологія та метод мультиплексування. У ході написання роботи виявлені проблеми щодо покращення роботи системи, розглянуті шляхи модернізації та обрані відповідні способи.

Дана робота містить 71 сторінку, 21 рисунок та 1 таблицю.

Ключові слова: пасивна оптична мережа, стандарти PON, NG-PON2, WDM-PON.

## **ABSTRACT**

The thesis analyzed the development of passive networks and their current state. Differences of standards are defined and the decision on introduction of optical passive networks of the next generation NG-PON2 is made. Based on the analysis of methods for building passive optical networks, the topology and multiplexing method were chosen. In the course of writing the work, problems for improvement the system, the ways of modernization were considered and the appropriate methods were selected.

This work contains of 71 pages, 21 figures and 1 table.

Keywords: passive optical network, PON standards, NG-PON2, WDM-PON.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	11
РОЗДІЛ 1.....	13
ЕВОЛЮЦІЯ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ .....	13
1.1 Оптичне волокно .....	13
1.2 Еволюція та впровадження новітніх технологій пасивних оптичних мереж .....	19
1.3 Переваги та недоліки пасивних оптичних мереж .....	30
Висновки: .....	35
РОЗДІЛ 2.....	37
АНАЛІЗ АКТИВНИХ ТА ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ.....	37
2.1 Активні та пасивні оптичні мережі .....	37
2.2 Варіанти архітектури мережі PON та NG-PON .....	46
2.3 Комбіновані оптичні мережі з використанням WDM .....	50
Висновки: .....	54
РОЗДІЛ 3.....	56
СПОСОБИ МОДЕРНІЗАЦІЇ NG-PON2.....	56
3.1 Аналіз підсилювачів для модернізації системи .....	56
3.2. Варіант застосування RSOA-FCL у мережі WDM.....	64
3.3. Моделювання RSOA .....	67
Висновки: .....	71
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ASE	(Amplified Spontaneous Emission) – посилене спонтанне випромінення
AWG	(Arrayed Waveguide Grating) – дифракційна хвилеводна решітка
EDFA	(Erbium Doped Fiber Amplifier) – легований ербієм волоконний підсилювач
FSAN	(Full Service Access Network) – мережа повного доступу до послуг
FTTx	(Fiber-To-The-x) – оптичне волокно до точки x
FTTB	(Fiber-To-The-Building) – оптичне волокно до будинку
FTTH	(Fiber-To-The-Home) – оптичне волокно до квартири
FTTN	(Fiber-To-The-Node) – оптичне волокно до мережевого вузла
FTTP	(Fiber-To-The-Premises) – оптичне волокно до приміщення
FSR	(Free Spectrum Range) – вільний спектральний діапазон
FEC	(Forward Error Connection) – пряма корекція помилок
GPON	(Gigabit Passive Optical Network) – гігабітна пасивна оптична мережа
APON	(ATM Passive Optical Network) – гігабітна пасивна оптична мережа
BPON	(Broadband Passive Optical Network) – широкопasmугова пасивна оптична мережа
EPON	(Ethernet Passive Optical Network) – пасивна оптична мережа Ethernet
WGR	(Waveguide Grating Router) – маршрутизатор з хвилеводними ґратами
RN	(Remote Node) – віддалений вузол
OLT	(Optical Line Terminal) – оптичний лінійний термінал
ONU	(Optical Network Unit) – оптичний мережевий блок
ONT	(Transport Layer Security) – оптичний мережевий блок
ODN	(Optical Distribution Network) – оптична розподільна мережа

ISDN	(Integrated Services Digital Network) – цифрова мережа з інтеграцією служб
ATM	(Asynchronous Transfer Mode) – асинхронний транспортний режим
WDM	(Wavelength Division Multiplexed) – спектральне ущільнення каналів
TDMA	(Time Division Multiple Access) – множинний доступ з часовим поділом
MAC	(Media Access Control) – управління доступом до мережі
RTO	(Real-Time Oscilloscope) – осцилограф реального часу
SONET	(Synchronous optical network) – синхронна оптична мережа
PSTN	(Public Switched Telephone Network) – телефонна мережа загального користування
SDH	(Synchronous Digital Hierarchy) – синхронна цифрова ієрархія
DBA	(Dynamic Bandwidth Allocation) – динамічний розподіл пропускнуої здатності
PLOAM	(Physical Layer Operation Administration and Maintenance) – управління, експлуатація та обслуговування фізичного рівня
GEM	(GPON Encapsulated Method) – метод інкапсуляції гігабітного PON
DFB laser	(Distributed Feedback Laser) – лазер з розподіленим зворотнім зв'язком
IEEE	(Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Інститут інженерів електротехніки та електроніки
XGTC	(XG-PON Transmission Convergence) – конвергенція передачі XG-PON
XGEM	(XG-PON Encapsulation Method) – множинний доступ з часовим поділом
DWDM	(Dense Wavelength Division Multiplexing) – щільне мультиплексування з поділом по довжині хвилі
OOFDMA	(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) – ортогональне

відділення частоти з множинним доступом

AON	(Active Optical Network) – активна оптична мережа
TC layer	(Transmission Convergence layer) – рівень конвергенції передачі
SDU	(Service Data Unit) – сервісний блок даних
PCS	(Physical Coding Sublayer) – підрівень фізичного кодування
PMA	(Physical Medium Attachment) – підключення до фізичного середовища
GMIІ	(Gigabit Media-Independent Interface) – гігабітний медіа-незалежний інтерфейс
PHY	(Physical Layer) – фізичний рівень
LLID	(Logical Link Identifier) – ідентифікатор логічних посилань
IP	(Internet Protocol) – Інтернет протокол
CO	(Central Office) – центральний офіс
SSLED	(Sliced Light-Emitting Diode) – нарізний світловипромінюючий діод
RSOA	(Reflective Semiconductor Optical Amplifier) – відбиваючі напівпровідникові оптичні підсилювачі
CD	(Chromatic Dispersion) – хроматична дисперсія
SOA	(Semiconductor Optical Amplifier) – напівпровідниковий оптичний підсилювач)
FCL	(Fiber Cavity Laser) – волоконний резонатор
RIN	(Relative intensity noise) – відносна інтенсивність шуму
FRM	(Faraday Rotator Mirror) – обертальне дзеркало Фарадея
FR	(Faraday Rotator) – обертач Фарадея
OBPF	(Optical Bandpass Filter) – оптичний смуговий фільтр
VOA	(Variable Optical Attenuator) – змінний оптичний атенюатор
PDG	(Polarization Dependent Gain) – поляризаційно залежне підсилення
DF	(Distributed Fiber) – розподілювальне волокно
FF	(Feeder Fiber) – фідерне волокно

OSA	(Optical Spectrum Analyzer) – аналізатор оптичного спектру
RIN	(Relative Intensity Noise) – відносна інтенсивність шуму
NRZ	(Non Return To Zero) – код без повернення до нуля

## ВСТУП

**Актуальність.** Оптичні мережі на даний час активно впроваджуються в мережі доступу все більш швидкими темпами, що пояснюється інтенсивним зростанням інтернет-трафіку, а також розширенням використання додатків з інтенсивною смугою пропускання. Мультимедійні сервіси вимагають вищих вимог до пропускної здатності. Оптичне волокно порівняно з міддю може забезпечити більш високу пропускну здатність на більшій відстані.

Щоб частково виконати вищезгадані вимоги, телекомунікаційні компанії вже розгорнули мережі оптичне волокно до точки x (Fibre-To-The-x, FTTx) в різних частинах світу. Концепція різних варіацій технології FTTx, а саме волокно до квартири (Fiber to the Home, FTTH), волокно до мікрорайону (Fiber to the Curb, FTTC) і волокно до будинку (Fiber to the Building, FTTB), полягає в наданні швидких оптоволоконних з'єднань в безпосередній близькості від приміщень кінцевого користувача.

Мережі FTTx в основному являють собою пасивні оптичні мережі (Passive Optical Network, PON), які розглядаються як одна з найбільш перспективних альтернатив для домінування в широкосмуговий доступ через їх економічно ефективний і практично необмежений потенціал смуги пропускання. PON широко використовуються в технологіях FTTx, створюючи оптичні світлові шляхи без урахування оптичних перетворень [1].

Так як з усіх стандартів саме NG-PON2 підтримує найвищий показник пропускної здатності, то для модернізації розглядатимемо саме його. NG-PON2 забезпечує швидкості не менше 40 Гбіт/с у вхідному напрямку, 10 Гбіт/с у вихідному. Об'єднання довжин хвиль має певні переваги для клієнтів: підвищення швидкості для певної послуги, ізоляція кожної послуги і т.д.

Цей підхід дозволяє провайдеру економити кабельну інфраструктуру та надавати більш захищений сервіс. В умовах зростання кількості клієнтів

можна переключати абонентські пристрої на нові довжини хвиль і це не завадить роботі мережі. При цьому немає необхідності у повністю новому розгортанні системи, якщо це не побудова мережі «з нуля».

**Об'єктом досліджень** є удосконалення функціонування пасивної оптичної мережі наступного покоління.

**Предмет досліджень** – пасивна оптична мережа в інформаційно-комунікаційних мережах зв'язку.

**Мета досліджень** – підвищення пропускної здатності у пасивних оптичних мережах.

**Наукова новизна дослідження** – об'єднання довжин хвиль для підвищення швидкості для певної послуги, ізоляція кожної послуги.

## РОЗДІЛ 1. ЕВОЛЮЦІЯ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

### 1.1 Оптичне волокно

Оптичне волокно представляє собою внутрішнє діелектричне середовище, в якому міститься основна частина світлової енергії. Передача даних в оптоволокну відбувається за допомогою світла, яке поширюється по оптоволоконному кабелю, багаторазово відбиваючись від стінок. Серцевина може бути оточеною шаром з нижчим показником заломлення, яка називається оболонкою [2].

Промені видимої області спектра входять в оптоволокну під різними кутами і йдуть різними шляхами. Як видно з рисунка 1.1, промінь, який увійшов в центр серцевини під малим кутом піде прямо і по центру волокна. Якщо під великим кутом або біля краю сердечника, то піде по ламаній і буде проходити по оптоволокну більш повільно. Кожен шлях, прямуючи з даного кута і точки падіння дасть початок моді. Оскільки моди переміщуються уздовж волокна, кожна з них певною мірою послаблюється.

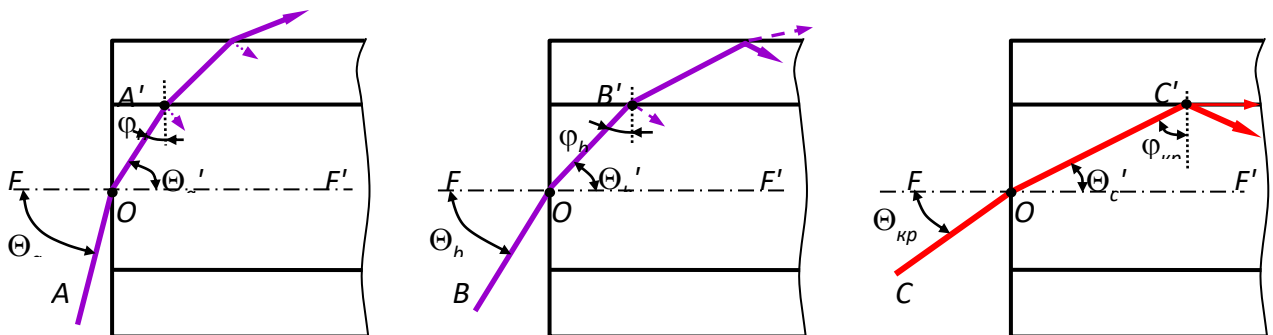


Рис. 1.1 Розповсюдження світла у оптоволокну

Промінь світла вводиться в волокно під максимальним кутом  $\theta_{кр}$ , при якому світло відчуває повне внутрішнє відбиття і поширюється по волокну. Можливість оптоволокну прийняти світло в серцевину визначається числовою апертурою за формулою (1.1).

$$NA = n_0 \sin \theta_{кр} \quad (1.1)$$

Де  $N$  – кількість мод,  $A$  – числова апертура волокна,  $n_0$  – показник заломлення навколо волокна,  $\theta_{кр}$  – найбільший кут падіння променів, які зазнають повного внутрішнього відбиття.

Поширення променя світла в оптичному волокні відбувається за законом Снелла-Декарта. Частина світла вводиться через повний приймальний конус оптоволокна. При цьому виникають такі явища, як заломлення та відбиття. Перше явище виражається в зміні кута проходження променя світла через границю двох середовищ. Якщо  $\theta > \theta_0$ , то промінь повністю заломлюється і виходить з серцевини. Відбиття є зміною напрямку світлового променя на границі між двома середовищами. В цьому випадку, світловий промінь повертається в серцевину. Якщо  $\theta < \theta_0$ , то промінь відбивається і залишається в серцевині.

Пропускна здатність оптичного волокна залежить від ширини частотного діапазону, на якому здатне працювати оптичне волокно. Пропускна здатність волокна визначає максимальна інформаційна ємність каналу, який може бути переданий уздовж волокна з даного відстані. У багатомодовому оптоволокні пропускна здатність, головним чином, обмежена модовою дисперсією, тоді як таке обмеження відсутнє для одномодових волокон [3].

Виділяють два основні типи оптичного волокна за режимом роботи: одномодові та багатомодові.

У одномодового волокна, зображеного на рисунку 1.2, діаметр сердечника набагато менше, ніж у багатомодового. Діаметр багатомодового волокна становить 50 мкм і 62,5 мкм, така ширина дозволяє подавати кілька мод в одне волокно, але так само і збільшує ймовірність відбиття світла від зовнішньої поверхні сердечника, що і викликає загасання сигналу. У одномодовому волокні діаметр сердечника становить 10 мкм і менше. У

такому волокні ймовірність дисперсії значно знижується, що дозволяє передавати дані на великі відстані.

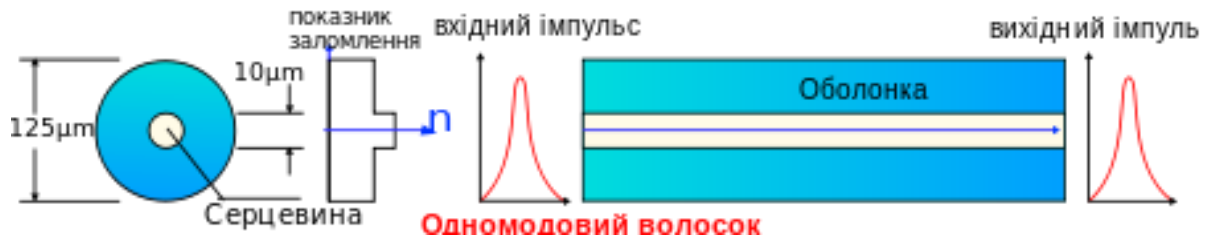


Рис. 1.2 Одномодове волокно

Структура багатомодового волокна, зображена на рисунку 1.3, відрізняється великим діаметром серцевини і можуть бути зі ступінчастим або градієнтним профілем. У першому випадку моди розходяться по різних траєкторіях і тому приходять до кінця світловоду в різний час. Багатомодове волокно проводить промені світла вздовж серцевини завдяки ефекту повного внутрішнього відбиття. Промені, що потрапляють на межу розділу компонентів волокна під гострим кутом, більшим ніж кут повного внутрішнього відбиття, зазнають відбиття. Промені, що стикаються із границею під малим кутом заломлюються у напрямку від серцевини до оболонки, а далі поглинаються і не передають інформацію.

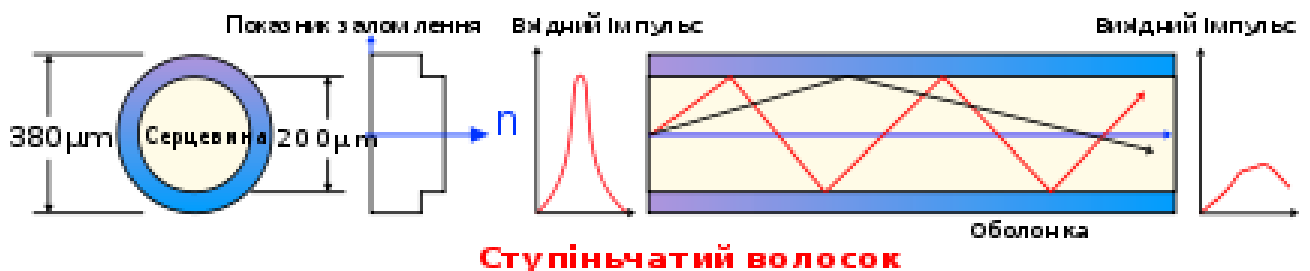


Рис. 1.3 Багатомодове волокно

Значна цифрова апертура дає можливість світлу поширюватися вздовж волокна завдяки розташованим близько до осі променям, а також під

різноманітними кутами, дозволяючи ефективне компонування пучка випромінювання у світловоді.

При градієнтному профілі тимчасові затримки різних мод практично повністю зникають, що показує рис. 1.4, і промені йдуть плавно завдяки зміні швидкості поширення світла по хвилеподібним спіралям. Коефіцієнт заломлення у серцевині такого волокна зменшується поступово від осі до зовнішньої стінки волокна. Тому промені світла вигинаються дугою наближаючись до оболонки. Таким чином зменшується багатовекторна дисперсія розповсюдження, тому що промені під значними кутами проходять через ділянку серцевини із малим показником заломлення швидше, ніж під великим.

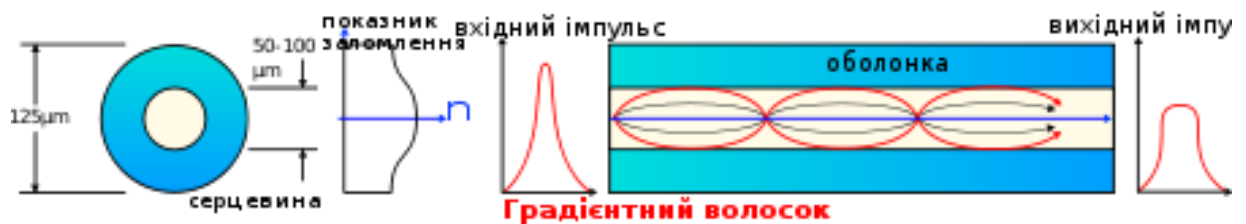


Рис. 1.4 Градієнтне волокно

Для мінімізації різниці між поздовжньою швидкістю розповсюдження променів різної векторної направленості у волокні необхідно вибрати профіль градієнту заломлення. Ідеальний профіль градієнту заломлення дуже близький до параболічного при співвідношенні самої величини та відстані до осі [4].

Застосовуються такі види одномодового волокна: ступінчасте, зі зміщеною дисперсією, з ненулевою зміщеною дисперсією. Міжмодова дисперсія у першому випадку усунута. Передача даних відбувається а довжинах хвиль 1310 та 1550 нм. Хроматична дисперсія відсутня на хвилі 1310 нм. Варто зауважити, що затухання на другій довжині хвилі менше. В другому типі волокна передача відбувається на робочій довжині хвилі в 1550 нм, так як хвиля нулевої дисперсії зміщена на це вікно. Виріб володіє

властивостями, які підходять для будівництва довгих ліній – це мінімум втрат та дисперсії. У волокні зі зміщеною дисперсією дані передаються у вікні 1530–1560 нм. Його відмінність полягає у можливості передачі кількох довжин хвиль.

Волоконно-оптична лінія зв'язку – вид системи передачі, при якому інформація передається по ОВ.

Оптичний кабель є діелектриком, що робить його безпечним при передачі даних на різних об'єктах, а також володіє високою захищеністю від несанкціонованого доступу. Волоконно-оптичні лінії зв'язку важко прослухати без порушення структури волокна через те, що випромінення відбувається майже у радіодіапазоні. Будь-які дії на волокно можуть бути зареєстровані за допомогою безперервного контролю цілісності лінії.

Низький рівень шумів досягається за рахунок різних видів модуляції з малою збитковістю коду.

Розміри і вага, які менші, ніж у інших напрямних систем електрозв'язку полегшують монтаж. Також це робить ОВ найперспективнішими для використання в кабельній техніці, приладобудуванні та ін. Затухання, яке сягає менше 0,2 дБ/км на довжині хвилі 1,5 мкм, з часом підвищується. Але завдяки технологіям виготовлення довговічність ОВ може перевищити 20 років.

Як бачимо, переваги перекривають недоліки, тож подальший розвиток мереж стоїть за оптичним волокном. Технології ВОЛП вирішують питання активного обладнання, протоколів передачі, стандартизації та принципи побудови мережі [5].

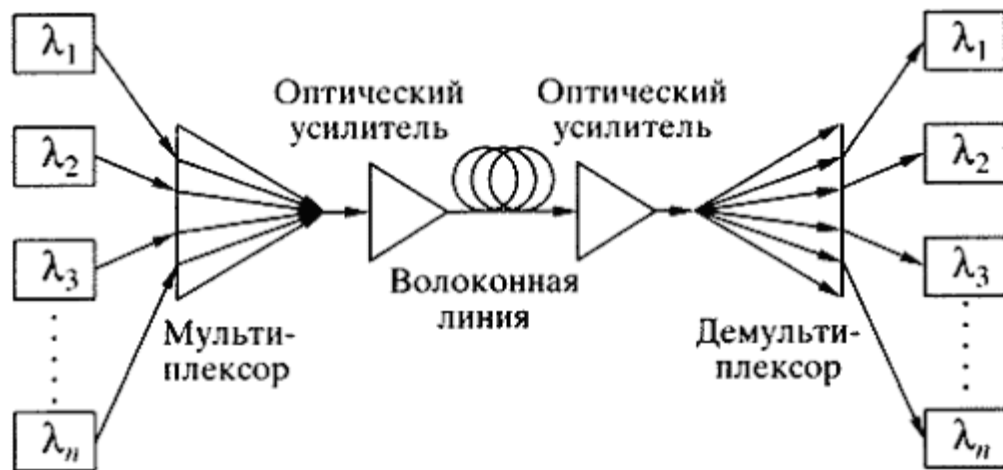


Рис. 1.5 Структура волоконно-оптичної лінії передачі

Варто звернути увагу до підсилювачів лінії передачі. Ці пристрої як відомо поділяються на оптичні та електронно-оптичні. У даній роботі розглядається перший вид, так як у роботі розглядається пасивна мережа. До типів можна віднести:

Напівпровідні оптичні підсилювачі лазерного типу. Складаються з хвилеводу, напівпровідника з прямою захищеною зоною (лазер Фабрі-Перо)

- романівський волоконний підсилювач. За одиницю часу підсилюють декілька каналів;

- підсилювачі на домішковому волокні. Вони працюють з великою кількістю каналів у широкому діапазоні;

- підсилювачі на волокні, з бріллюенівським розсіюванням;

- резонаторний підсилювач Фабрі-Перо;

Останні два пристрої характерні тим, що підсилюють одну довжину хвилі [6].

## 1.2 Еволюція та впровадження новітніх технологій пасивних оптичних мереж

Існує кілька типів систем PON, вказані на рисунку 1.5, які за останні роки були розгорнуті в якості технологій доступу: Asynchronous Transfer Mode PON (APON), широкосмуговий PON (Broadband PON, BPON), Ethernet PON (EPON), гігабітний PON (Gigabit PON, GPON), 10 Gigabit Ethernet PON (10G EPON) і PON1 наступного покоління (NGPON1). У цьому розділі будуть розглянуті дані стандарти.

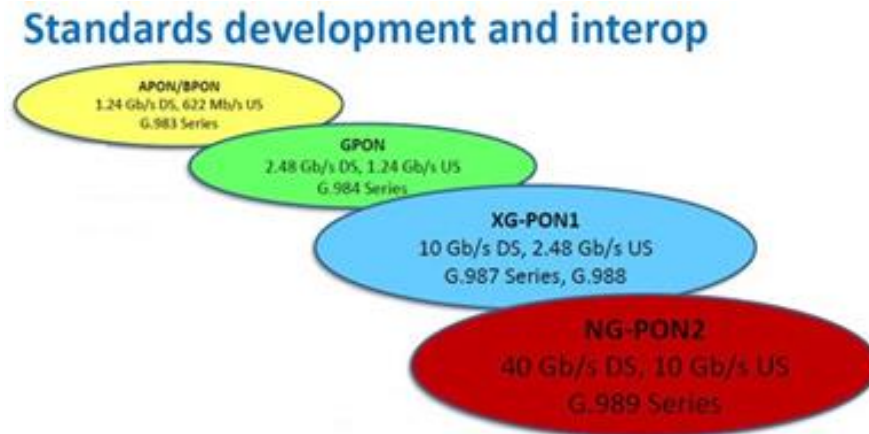


Рис. 1.5 Розвиток пасивних оптичних мереж

Перші системи PON були засновані на протоколах асинхронного режиму передачі. Це пов'язано з тим, що стан телекомунікаційних мереж на початку і середині дев'яностих років все ще був зосереджений на технологіях з комутацією каналів, таких як T1 і цифрова мережа з інтеграцією служб (Integrated Services Digital Network, ISDN) [7]. Протоколом, обраним для використання нових волоконно-оптичних мереж, була синхронна оптична мережа (Synchronous Optical Network, SONET) [8]. Мережі SONET забезпечили досить різкий стрибок в продуктивності і пропускній здатності в порівнянні з традиційними комутованими мережевими протоколами. Тому, при розробці магістралі SONET операторами, було необхідно розробити нове волоконно-оптичне рішення для відповіді на запит про більшу пропускну

здатність в «останній милі» надання абонентських послуг. Це посприяло прийняттю стандарту APON. Стандарт, відомий як ITU-T G.983 описував передачу через ячейки асинхронного транспортного режиму та включав в себе ряд варіацій швидкості лінії (пропускної здатності), але був майже виключно реалізований як вхідний потік у 622 Мбіт/с і вихідний – 155 Мбіт/с та підтримував 32 абонента. Він також включав механізм безпеки шифрування, який навіть за стандартами середини 1990-х років вважався досить слабким.

Як і APON, широкосмуговий PON також використовує 622 Мбіт/с в низхідному і 155 Мбіт/с у вихідному напрямках. Завдяки своєму початку в АТМ, BPON значною мірою орієнтований на мультиплексування з часовим поділом (Time Division Multiplexing, TDM) [9]. Корисне навантаження вихідного потоку кадру BPON складається з 53 тимчасових інтервалів, як і в АТМ. Для кожного з цих тимчасових інтервалів BPON є 48-байтовий осередок АТМ, яка включає в себе додаткові 5 байтів службової інформації. Ця службова інформація забезпечує поділ між сусідніми часовими інтервалами ОНТ на одному і тому ж PON.

Фактично, синхронізація BPON вимагає 154 наносекунди, щоб дозволити вимкнути один лазер у абонентському терміналі (Optical Network Terminal, ONT), а потім включити наступний лазер ONT, а також забезпечити правильну синхронізацію з оптичним лінійним терміналом (Optical Line Terminal, OLT). Лазер ONT також повинен використовувати цю службову інформацію для налаштування своєї вихідної потужності (посилення), щоб пристосовуватися до різних оптичних втрат через зрощування, роз'ємів і відстаней волокон. Лазер повинен бути включений, а також забезпечити правильну синхронізацію з OLT. Лазер ONT також повинен використовувати службову інформацію, щоб налаштувати свою вихідну потужність (посилення) та пристосовуватися до різних оптичних втрат через зрощування, роз'ємів і відстаней волокон.

Тож, метою ВРОН було домогтися економічно ефективного розгортання систем широкосмугового оптичного доступу. Завдяки розширенню спектрального діапазону з'явилася можливість для додаткових послуг вже на інших довжинах хвиль. Таким чином, ВРОН пропонує численні послуги широкосмугового доступу, включаючи АТМ, доступ до Ethernet і поширення відео. ВРОН використовує АТМ як сигнальний і транспортний протокол, як і АРОН.

ВРОН також забезпечує підвищену безпеку. Ще одна істотна відмінність двох стандартів полягає в тому, що ВРОН дозволяє розповсюдження відео. У цьому стандарті удосконалене використання WDM, додавши додаткові довжини хвиль для поширення відео [10].

ВРОН підтримує швидкості низхідної лінії зв'язку 155,52, 622,08 і 1244,16 Мбіт/с і швидкості висхідної лінії зв'язку 155,52 і 622,08 Мбіт/с. ВРОН використовує мультиплексування з часовим поділом, а його часові інтервали містять осередки АТМ або управління, технічного обслуговування і обслуговування фізичного рівня. Висхідна лінія зв'язку використовує множинний доступ з часовим поділом (Time Division Multiple Access, TDMA) [11] для мультиплексування різних блоків оптичної мережі, і реалізований механізм DBA. Зв'язок між оптичним лінійним терміналом і кінцевим абонентським пристроєм заснований на віртуальних каналах АТМ, які здатні реалізовувати різні рівні якості обслуговування (Quality of Service, QoS).

Технології АРОН і ВРОН мають один базовий протокол АТМ з лінійним кодом NRZ, передбачають технологію корекції помилок FEC і захист даних за рахунок шифрування відкритими ключами. Останній аспект має високу важливість в силу широкомовності передачі даних і можливості перехоплення даних будь-яким мережевим терміналом, підключеним до пасивної оптичної мережі PON.

Максимальний фізичний радіус дії ВРОН становить 20 км. Довжина хвилі у низхідній лінії зв'язку повинна бути в діапазоні 1480–1500 нм, а

довжина хвилі висхідній лінії зв'язку повинна бути в діапазоні 1260–1360 нм. Довжина хвилі аналогового відеомовлення була визначена в діапазоні 1539–1565 нм.

В даний час в світі використовуються два основні стандарти FTTH PON: мережа на основі Ethernet, формалізована у стандарті IEEE 802.3ah і гігабітний PON в стандарті ITU-T G.984. В обох рішеннях обладнання є повністю пасивним, покриває відстані до 20 км, використовує топологію «точка-багатоточка», забезпечує більш широку смугу пропускання для кінцевого користувача і дозволяє здійснювати відеомовлення (цифрове та/або аналогове). Коефіцієнт поділу (кількість користувачів на волокно) є змінним – зазвичай від 32 до 64 користувачів. Фактично, основні фізичні характеристики обох стандартів дуже схожі, що робить їх більш різними – це протокол MAC і схема інкапсуляції даних. У той час як EPON переносить пакети чистих кадрів Ethernet, GPON інкапсулює дані з використанням Generic Encapsulation Method.

Ethernet PON був розроблений для доведення Ethernet до житлових та ділових клієнтів у мережі доступу, і він був швидко прийнятий, в першу чергу завдяки його всюдисущій та економічно вигідній технології, що дозволяє забезпечити сумісність з різноманітним застарілим обладнанням. EPON здатний надавати послуги Triple Play при симетричних швидкостях 1,25 Гбіт, використовуючи довжину хвилі при передачі 1490 нм і 1310 нм та прийом – 1550 нм, що зарезервованій для розширення послуг на майбутнє, таких як аналогова відео трансляція приблизно для 32 ONU на відстані до 20 км. У верхній течії використовується нетиповий протокол контролю доступу (Media Access Control, MAC) [12], уникаючи зіткнень даних у розподільній мережі. З метою розширення обмеження ємності EPON за допомогою швидкості передачі даних та коефіцієнта поділу, ITU-T встановив стандарти для GPON в серії G.984.

EPON не є стандартом, орієнтованим на ATM або TDM на відміну від BPON та GPON. EPON використовує кадри Ethernet для передачі даних і забезпечує безшовну інтеграцію з технологіями IP і Ethernet що робить EPON привабливою моделлю для постачальників послуг, у яких немає застарілих білінгових систем, систем ATM та SONET.

В результаті EPON забезпечує відмінну масштабованість, простоту, придатність і можливість надання повного доступу до послуг. EPON працює зі швидкістю 1,25 Гбіт/с у висхідному напрямку і 1,25 Гбіт / с в низхідному напрямку (симетрично) з максимальною відстанню 20 км і коефіцієнтом розподілення – 32. Швидкість передачі даних симетрична, до 1 Гбіт/с, тому максимальна смуга пропускання, виділена кожному ONU, зазвичай становить близько 70 Мбіт/с, хоча це залежить від кількості активних ONU і профілів трафіку користувачів. Стандарт EPON фокусується на визначенні фізичного рівня і рівня MAC. EPON складається з двох типів активних терміналів: OLT і ONU. Сигнал виходить пасивним оптичним перехідником на дальньому кінці мережі.

Для розширення обмеження ємності EPON, швидкостей передачі даних і коефіцієнта розподілення, ITU-T встановив стандарти для GPON в серії G.984 [13]. Так затвердили новий стандарт для задоволення потреб PON з більш високими швидкостями, різноманітністю послуг і більш ефективним використанням пропускнуої спроможності з використанням пакетів різної довжини. Цей новий стандарт отримав назву GPON. Одна з цілей цього стандарту – сумісність з попередніми стандартами. Підтримувані в цьому стандарті швидкості складають 1,24 і 2,5 Гбіт/с на низхідній лінії зв'язку і 155,52 Мбіт/с, 622,08 Мбіт/с, 1,24 Гбіт/с і 2,5 Гбіт/с на висхідній лінії зв'язку, і він може працювати в симетричному або асиметричному режимі.

Використовується призначення однакових довжин хвиль, що дозволяє операторам мережі налаштовувати швидкості передачі відповідно до вимог користувача. А також стандарт забезпечує практично подвоєну ефективність

при передачі даних використання смуги пропускання завдяки меншим накладним витратам. GPON передає дані, використовуючи одну довжину хвилі на кожному волокні.

GPON здатний вимикати один лазер ONT при підготовці до включення наступного лазера ONT. В GPON часовий інтервал, дозволений для цього взаємодії, становить 13 нс [14]. Це майже в 12 разів вужче вікно, ніж у мережах з попереднім стандартом.

GPON може транспортувати трафік Ethernet, ATM та TDM (ISDN, PSTN, E1 і E3) і складається з обладнання передачі OLT і ONU або ONT. GPON є в основному транспортним протоколом, який використовує методи SDH, SONET і загальну процедуру кадрів (Generic Framing Procedure, GFP) для передачі сигналів Ethernet.

Проблеми безпеки у вхідному потоці, GPON забезпечує розширений стандарт шифрування [15]. В якості базового протоколу передачі даних в GPON використовується синхронна цифрова ієрархія (Synchronous Digital Hierarchy, SDH), лінійне кодування без повернення до нуля, використовується корекція помилок (Forward Error Correction, FEC) і динамічний розподіл смуги пропускання DBA. Особливістю GPON є підтримка до 128 абонентів на одній гілці дерева PON в радіусі до 20 кілометрів. Шифрування трафіку здійснюється відкритими ключами [16].

У цьому стандарті використовується кадрів рівня конвергенції передачі GPON GTC, яке забезпечує різні функції, такі як транспортний мультиплексування між OLT і ONU, функції PLOAM, інтерфейс DBA, ранжування і реєстрація ONU або FEC (Reed-Solomon (255,223)) і спадний потік. Шифрування даних в якості додаткової функції. Режими роботи ATM і IP, голос та відео інкапсульовані в кадри методу інкапсуляції гігабітного PON (GPON Encapsulated Method, GEM), підтримуються в стандарті GPON. Інкапсуляція GEM з можливістю сегментації дозволяє використовувати схеми TDM. TDMA використовується для висхідної лінії зв'язку. В технології

GPON використовується дворівнева інкапсуляція: спочатку потоки TDM, E1/T1 і кадри Ethernet розміщуються в кадрах GEM зі змінною довжиною корисних даних, що мають формат Generic Frame Procedure, ITU-T G.7401. Далі ATM та GEM спільно інкапсулюються у кадри GTC. Саме вони передаються по пасивній оптичній мережі PON.

Максимальний фізичний радіус дії, підтримуваний цим стандартом, складає 20 км з коефіцієнтом поділу 1:64 (враховуючи також максимальний радіус дії 60 км або коефіцієнт поділу 1:128 для майбутніх потреб). Діапазон довжин хвиль низхідній лінії зв'язку становить 1480–1500 нм. Діапазон довжин хвиль висхідній лінії зв'язку становить 1260–1360 нм для варіанта зі звичайною смугою (з використанням лазерів Фабрі-Перо), 1290–1330 нм для варіанта зі зменшеною смугою (з використанням звичайного лазера DFB) і 1300–1320 нм для варіанту з вузькою смугою (з використанням лазерів з обраної довжиною хвилі), відеомовлення має здійснюватися в діапазоні довжин хвиль 1550–1560 нм. На рисунку 1.5 показаний огляд призначення довжини хвилі.

Необхідний час перемикання лазера становить 13 нс. Бюджет втрат для GPON становить 28 дБ для бюджету класу В+ і 32 дБ для бюджету класу С+.

GPON забезпечує велику пропускну спроможність і діапазон в порівнянні з APON, BPON і EPON.

Найостанніші стандарти IEEE і ITU-T мають зворотну сумісність з попередніми поколіннями PON, що дозволяє здійснювати поступове оновлення з мінімальними фінансовими інвестиціями в оптичну розподільну мережу (Optical Distribution Network, ODN) і мінімальним ефектом від роботи користувачів.

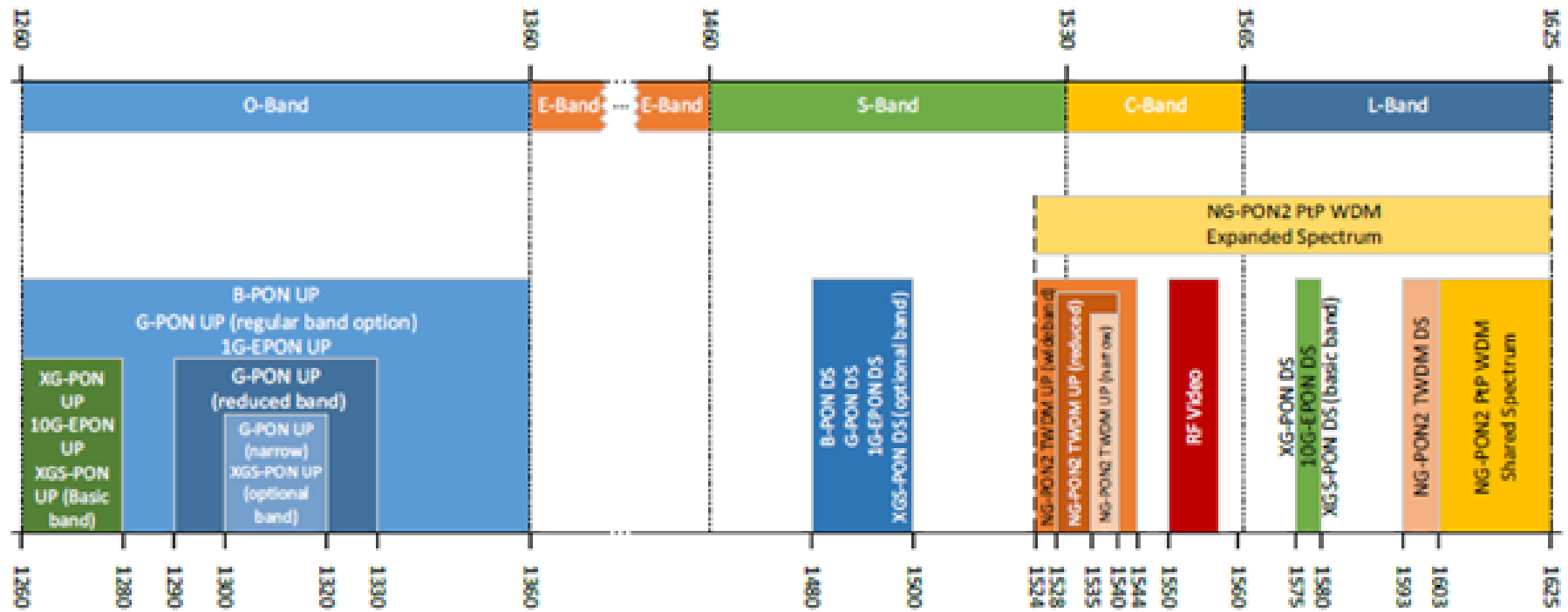


Рис. 1.5 Діапазони довжин хвиль для BPON, GPON, XGPON, NG-PON2, XGSPON, 10-EPON

Через необхідність більшої смуги пропускання було розроблено 10G-EPON і XG-PON відповідно. Хоча ці два стандарти дуже різні за виконанням.

10G-EPON є прикладом технології NG-PON1. Стандарт IEEE 802.3av, який був випущений в 2009 році [17]. Сумісний з 802.3ah EPON. Іншим прикладом є стандарт ITU-T G.987, також відомий як XG-PON. 10G-PON є мережевим стандартом для каналів передачі даних, здатним забезпечити спільну швидкість доступу в Інтернет до 10 Гбіт/с і 2,5 Гбіт/с у висхідному напрямку. XG-PON – це стандарт ITU-T наступного покоління, який впливає з GPON. Серія ITU-T G.987.x відповідає загальним вимогам пасивних оптичних мереж з пропускнуою здатністю 10 Гбіт/с таким чином, щоб забезпечити сумісність з існуючими ODN, сумісними з системами GPON. Крім того, система XGPON використовує мультиплексування з поділом по довжині хвилі (Wavelength Division Multiplexing, WDM), визначене в ITU-T G.984, і забезпечує плавний перехід від Gigabit PON до XG-PON.

Відповідно до специфікацій, 10G-EPON пропонує симетричні 10 Гбіт / с в низхідній лінії зв'язку і висхідній лінії зв'язку, а також асиметричні швидкості передачі в низхідній лінії зв'язку 10 Гбіт / с і 1 Гбіт / с. Крім того, в 10G-EPON OLT обладнаний двошвидкісними приймачами для ONU 1G або 10G для забезпечення сумісності з існуючим і широко поширеним 1G -EPON. Крім того, канали передачі низхідній лінії зв'язку розділені для відправки даних і керуючої інформації в ONU 1G і 10G.

10G-EPON збільшує швидкість передачі даних системи EPON з 1 Гбіт/с до 10 Гбіт/с. Він також успадковує протокол MPCP EPON, в той час як він фокусується на фізичному рівні.

Цільова група P802.3av стандартизувала 10G-EPON, розробляючи IEEE 802.3av, який забезпечує симетричні швидкості (спадна лінія і висхідна лінія 10 Гбіт/с) і асиметричні (спадна лінія 10 Гбіт/с і висхідна лінія 1 Гбіт/с).

До основних вимог стандарту IEEE 802.3av відносилися: збільшення швидкості передачі даних до 10 Гбіт/с і те, що новий стандарт може співіснувати з попередньою версією EPON 802.3ah в тій же мережі ODN. Він також виграє від асиметричної структури, де висхідний потік становить 1 Гбіт/с на тій же довжині хвилі 1310 нм, а спадний – 10 Гбіт/с на довжині хвилі 1270 нм.

Конструкція 10G-EPON спрямована на використання широко поширеної і зрілої технології Ethernet для скорочення зусиль по розробці компонентів, циклів проектування і загальної вартості.

З іншого боку, XG-PON націлені на більш високі швидкості лінії, приймаючи на себе більш високі витрати на схему приймача, в той же час націлює на набір механізмів для гнучкого мультиплексування трафіку, докладні специфікації управління трафіком і гарантії QoS з кращим контролем розподілу мережевих ресурсів, а також роботи і обслуговування. Крім швидкості передачі даних в синхронному і асинхронному режимах, в XG-PON1 для передачі даних задіяна пара довжин хвиль 1577 і 1270 нм, що дозволяє розгорнути пасивні оптичні мережі XG-PON1 поверх мереж GPON і EPON. Фізичний рівень, також званий рівнем фізичної середовища PMD, описаний в Рекомендації ITU-T G.987.2 і визначає гнучку оптоволоконну мережу доступу, здатну підтримувати вимоги високої пропускної здатності. Загальна вимога XG-PON – забезпечити більш високу швидкість передачі даних, ніж GPON, в поєднанні з мінімізованими витратами. Тому зворотна сумісність з успадкованими установками GPON була основною темою в специфікаціях фізичного рівня. Для досягнення сумісності і співіснування систем GPON і XG-PON довжина оптичної хвилі, обрана для XG-PON, була O-band (для висхідного діапазону від 1260 до 1280 нм) і 1577 нм (для низхідного потоку). XG-PON системи діляться на XG-PON1 (з висхідним трактом 2,5 Гбіт/с) і XG-PON2 (з пропускною здатністю 10 Гбіт/с).

Передача інформації при співіснуванні проходить на довжинах хвиль відмінних від вже використовуваних у системі стандартів. 10G-PON використовує недорогі оптичні компоненти з таким же оптичним бюджетом, як у GPON. Використання недорогих компонент особливо важливо для ONT (через їхню велику кількість на мережі).

XG-PON повинен співіснувати з попереднім стандартом GPON та використовувати GPON-подібні кадри і протоколи для забезпечення співіснування між обома стандартами, а також підтримує фрейми Ethernet. Цей підрівень кадрів називається конвергенцією передачі XG-PON (XG-PON transmission convergence, XGTC), а метод інкапсуляції називається XGEM. XGEM забезпечує індивідуальні потоки трафіку, фрагментацію і конфіденційність даних. Цей стандарт вимагає суворої взаємної аутентифікації для захисту PON і варіантів енергозбереження на обладнанні. Використовуваний FEC в цьому стандарті є RS (255,223). Висхідний канал XG-PON орієнтований на пакетну передачу і використовує TDMA для забезпечення доступу до загального середовища.

Максимальний фізичний радіус дії цього стандарту складає від 20 до 60 км, а коефіцієнт поділу повинен бути 1:64 або 1:128. Максимальні вимоги не повинні виконуватися при одному і тому ж сценарії.

Діапазон довжин хвиль висхідній лінії зв'язку становить 1260–1280 нм, а діапазон довжин хвиль низхідній лінії зв'язку становить 1575–1580 нм, як показано на рисунку 1.5. Бюджет втрат для XG-PON становить 29 дБ для бюджету класу N1, 31 дБ для бюджету класу N2, 33 дБ для бюджету класу E1 і 35 дБ для бюджету класу E2 для випадків з приймачем PIN і APD.

Принципова відмінність між 10G-EPON і XG-PON полягає в тому, що XG-PON є транспортною технологією для Ethernet, а також для TDM і ATM. Крім того, GPON використовує карту розподілу смуги пропускання поза смуги пропускання з концепцією контейнерів трафіку як об'єкт, наданого в висхідному напрямку. Сервіси інкапсулюються в кадри в їх власному форматі

з допомогою процесу, званого XGEM, в той час як EPON не використовує інкапсуляцію (таким чином, трафік Ethernet транспортується спочатку, і всі функції Ethernet повністю підтримуються).

Проте, величезне зростання Інтернет-трафіку і додатків, заснованих на відео, демонструє недостатність пропускної здатності мережі доступу, причому очікувані майбутні сервіси будуть засновані на відеододатках з високою пропускною здатністю.

### **1.3 Переваги та недоліки пасивних оптичних мереж**

Багато переваг пасивної мережі пов'язано з особливостями оптичного волокна, тож виділяю основні переваги:

- більш висока пропускна здатність;
- можливість роботи на великих відстанях;
- безпека;
- відсутність активних пристроїв;
- перспективність створення розподільчої інфраструктури;
- забезпечення необхідного рівня якості обслуговування;
- висока гнучкість;

Пасивні оптичні мережі мають ряд явних переваг. Вони ефективні в тому, що кожна волоконно-оптичний ланцюг може обслуговувати до 128 користувачів. PON мають низьку вартість будівництва в порівнянні з активними оптичними мережами поряд з більш низькими витратами на обслуговування.

Одномодове оптичне волокно може підтримувати швидкість до 69 Тбіт/с. Цього достатньо для задоволення комунікаційних стратегій, усуваючи необхідність в окремих лініях для конвергентної передачі голосу, даних і відео. Відсутність активних елементів дає енергонезалежність по шляху від вузла зв'язку до клієнта. PON використовує тільки пасивну мережу, яка може

бути прихована, в землі і не вимагає витрат на обслуговування. У порівнянні з активними сплітерами пасивні менше за розміром.

Мережі проводового доступу, мають повністю оптичну кабельну інфраструктуру з перспективою на десятки років, тобто є можливість легко оновити до більш високої швидкості передачі даних.

Побудова розподільної мережі за технологією PON вимагає застосування всього лише одного оптичного волокна замість пучка волокон, що спостерігаємо при використанні інших оптоволоконних технологій. Це дозволяє побудову мережі по шинній чи деревовидній топології, що дуже вигідно з економічної точки зору. Гнучкість технології дозволяє використовувати її в будь-яких мережевих конфігураціях сімейства FTTx. Також надається повне управління підключенням користувача і споживаними сервісами.

Дивлячись на переваги зтикаємось з тим, що є і деякі недоліки. PON мають менший радіус дії, ніж активна оптична мережа, а це означає, що абоненти повинні бути географічно ближче до центрального джерела даних. Крім того, оскільки смуга пропускання в PON не виділена окремим абонентам, швидкість передачі даних може сповільнюватися під час пікових навантажень з ефектом, відомим як затримка. Затримка швидко погіршує такі послуги, як аудіо і відео, які вимагають плавної швидкості для підтримки якості. Одним з найбільших недоліків є те, що сплітери не володіють інтелектом і тому не можуть бути керованими. Тоді не можливо економічно ефективно перевіряти наявність проблем в разі збою в обслуговуванні. Ще одним серйозним недоліком є його негнучкість. Якщо необхідно змінити дизайн мережі або витягти нове волокно з розгалужувача висхідного потоку, всі наступні клієнти повинні відключитися для зміни розгалужувача в мережі. Нарешті, оскільки PON є загальною мережею, кожен абонент отримує однакову пропускну здатність. Таким чином, швидкість передачі даних може знизитися під час пікових навантажень.

У деяких випадках системи FTТх фактично об'єднують елементи як пасивної, так і активної архітектури, утворюючи гібридну систему.

Оптичне волокно достатньо крихке, тому при пошкодженнях воно може помутніти з часом або зламатися. Волокно, як і компоненти ВОЛЗ досить складні у виготовленні, складним є і перетворення сигналу в інтерфейсному обладнанні [18]. Поляризаційна модова дисперсія, накопичення шуму, нелінійні ефекти, хроматична дисперсія сприяють обмеженню швидкості передачі даних і максимальну відстань передачі.

Певні технологічні особливості, що ускладнюють пошук обривів мережі, несумісність обладнання різних виробників.

Оскільки дані в EPON і GPON передаються в усі ONU, це може привести до того, що невірна інформація потрапить до випадкового людини. Існує можливість підслуховування. Однак вартість, як економічну складову, важко віднести конкретно до переваги або недоліку. Розгортання оптичних мереж вважається дорогим через вартість оптичних пристроїв, задіяних в оптичній мережі, але співвідношення ціни та пропускної здатності для ВОЛЗ краще, ніж для інших систем. Тому в довготривалих проектах для операторів цей фактор буде невідчутним.

Таблиця 1.1

## Порівняння характеристик стандартів PON

	APON	BPON	EPON	GPON	10G EPON	10G- GPON	NG- PON2
Стандарт	ITU-T G.983.1	ITU-T G.983.3	IEEE 803.2.ah	ITU-T G.984	IEEE 802.3av	ITU-T G.987	ITU-T G.983
Висхідна швидкість, Gb/s	0,155 0,622	0,622	1,25	2,5	10	10	40



Оскільки системи PON вже розгорнуті, NG-PON2 постійно привертає увагу дослідників та інститутів.

Один з двох стандартів PON наступного покоління, NG-PON2, дозволяє об'єднувати мережі з декількома послугами в одну ODN, що призводить до значного зниження сукупної вартості володіння, а також дозволяє впроваджувати нові ефективні архітектури, які налаштовані для задоволення нових потреб абонентів.

GPON передає дані, використовуючи одну довжину хвилі на кожному волокні. NG-PON2 підтримує мінімум чотири довжини хвилі на кожному волокні, що робить його першим в галузі стандартом доступу до декількох довжин хвиль. Кожна довжина хвилі в одному волокні може забезпечувати симетричну швидкість 10 Гбіт/с. При об'єднанні чотирьох довжин хвиль пропускна здатність може досягати 40 Гбіт/с, і в майбутньому можна буде об'єднати вісім довжин хвиль для отримання 80 Гбіт/с. З цієї причини NG-PON2 часто називають 40G або 80G PON.

На додаток до збільшеної місткості, NG-PON2 має три переваги в порівнянні з іншими технологіями PON.

Управління потужністю на вимогу надає нові можливості надання послуг та поліпшення балансування навантаження.

Кілька довжин хвиль можуть бути використані для управління ємністю PON.

У міру зростання використання ємність PON можна легко перерозподілити, включивши нові канали і переключивши оптичні мережні блоки на різні довжини хвиль, не впливаючи на доставку існуючих послуг.

Підтримка восьми двоточкових накладених довжин хвиль, які можна використовувати для спеціалізованих сервісів, таких як корпоративні підприємства, fronthaul і т. д.

При переході з GPON на NG-PON2 необхідно зробити дві основні інвестиції:

Нові ONU з лазером, що переналаштовується (які можуть бути запрограмовані для різних каналів або довжин хвиль), фільтрів і приймачів необхідні для підтримки сумісних планів довжин хвиль. Деякі існуючі ONU вже оснащені таким лазером, а також фільтрами, які дозволяють співіснувати GPON і NG-PON2.

Потрібно, щоб нові лінійні карти OLT підтримували сумісні плани довжин хвиль [19].

До сих пір передбачається, що основними технологіями для участі в NG-PON2 є WDM, щільне мультиплексування з поділом по довжині хвилі (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) і ортогональне відділення частоти з множинним доступом (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OOFDMA) за їх переваги. Такі технології будуть відігравати ключову роль в майбутньому оптичного зв'язку [20].

Нові технології повинні бути впроваджені без шкоди для існуючих послуг і доходів. Оновлення також має бути привабливим з точки зору бізнесу, щоб поєднувати необхідність збільшення пропускної здатності з необхідністю отримання прибутку. NG-PON2 гарантує клієнтам низьку затримку і якість досвіду (QoE).

### **Висновки:**

Аналіз існуючих та перспективних технологій доступу показує великий прогрес у телекомунікаціях. Традиційні кабельні мережі на даний час поступаються своїми характеристиками та потенціалом. Запит на різні послуги росте як від бізнесу, так і від домашніх користувачів. Отже, огляд мережі наступного покоління показав, що вона дійсно підтримує ділові додатки, житлові послуги та може прийняти участь у розгортанні мереж 5G.

Нові технології повинні бути впроваджені без шкоди для існуючих послуг і доходів. Оновлення також має бути привабливим з точки зору бізнесу, щоб поєднувати необхідність збільшення пропускної здатності з

необхідністю отримання прибутку. NG-PON2 гарантує клієнтам низьку затримку і якість досвіду (QoE).

Пасивна оптична мережа другого покоління повинна бути маштабованою, гнучкою, надійною та ефективною як по пропускній здатності, так і по споживаній потужності тому стандарт NG-PON2 стане мультисервісною інфраструктурою.

## **РОЗДІЛ 2.**

### **АНАЛІЗ АКТИВНИХ ТА ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ**

#### **2.1 Активні та пасивні оптичні мережі**

Активна оптична система використовує комутаційне обладнання з електроживленням для управління розподілом сигналів і передачі сигналів конкретним клієнтам. Цей перемикач відкривається і закривається різними способами, щоб направляти вхідні та вихідні сигнали в потрібне місце. Таким чином, абонент може мати виділене волокно, що йде до нього або її дому.

Активні оптичні мережі також пропонують певні переваги. Їх залежність від технології Ethernet полегшує взаємодію між постачальниками. Абоненти можуть вибирати обладнання, яке забезпечує відповідну швидкість передачі даних і масштабується в міру збільшення їх потреб без необхідності реструктуризації мережі.

Вимоги до розгортання AON вищі, на відміну від нього архітектура PON простіша. Вимоги нижчі, так як відсутня необхідність у живленні та не виникає проблем з перегрівом. Тому PON може бути розгорнута швидше та дешевше.

Маршрутизатор або комутатор в AON можна використовувати як кінцевий пристрій оптичної мережі для окремих служб. Кожному абоненту виділено лазерний порт на вузлі AN. Якщо волоконно-оптичний канал розділений на кілька підключень клієнтів, потрібне додаткове активне обладнання.

Сплітер у пасивній мережі дозволяє передавати сигнали з одного порту OLT на кілька ONT. Таким чином використовується менше оптоволокна. Якщо оптоволоконному кабелю доводиться спільно використовувати кілька

клієнтів, можна використовувати простий пасивний оптичний розгалужувач. Оптичні шляхи можуть використовуватися декількома абонентами.

Кожен абонент активної мережі повинен бути підключений індивідуально у формі зірки. Якщо волоконно-оптична мережа має форму дерева, можлива економія в порівнянні з AON.

Архітектура мережі PON з використанням невеликого розгалужувача з 2 або 4 відгалуженнями дозволяє ефективно розподіляти витрати [21].

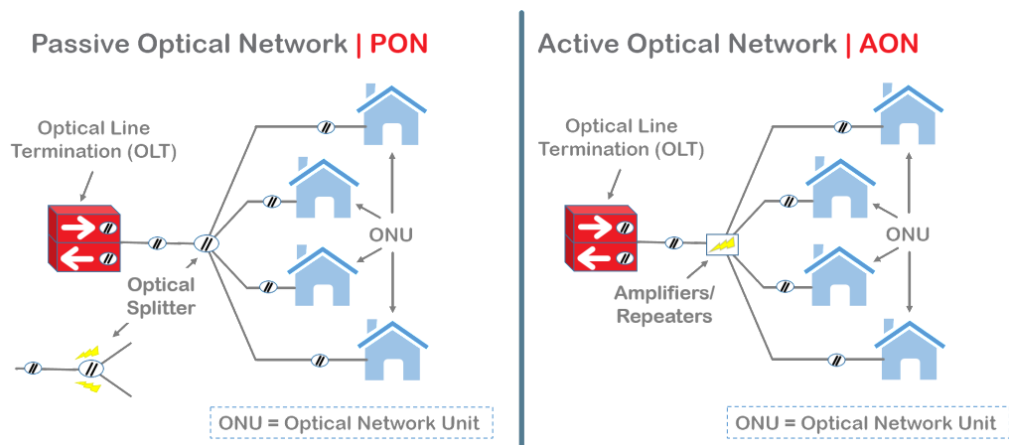


Рис. 2.1 Порівняння архітектури AON та PON

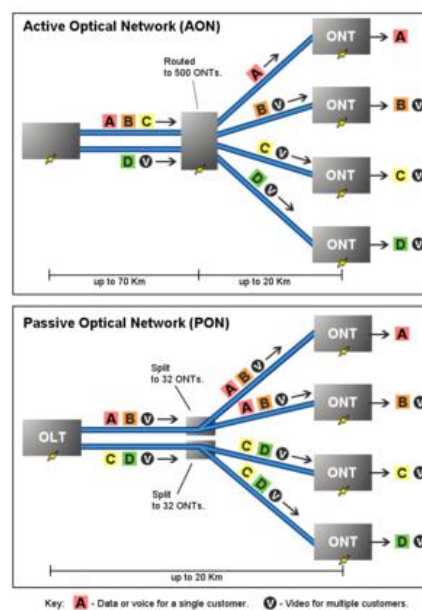


Рис. 2.2 Існуючі рішення AON та PON

AON також пропонує деякі переваги. Залежність від технології Ethernet полегшує взаємодію між постачальниками, тому абоненти можуть вибирати обладнання, яке забезпечує відповідну швидкість передачі даних і масштабується в міру збільшення їх потреб без необхідності реструктуризації мережі. AON має обмеження відстані 80 км незалежно від кількості обслуговуваних абонентів. Також AON властиві висока гнучкість при розгортанні різних послуг для приватних і корпоративних клієнтів.

Активні оптичні мережі, однак, також мають свої недоліки. Їм потрібен як мінімум один комутатор на кожні 48 абонентів. Оскільки для цього потрібно живлення, активна оптична мережа за своєю природою менш надійна, ніж пасивна оптична мережа.

Пасивна оптична мережа не включає в себе комутаційне обладнання з електроживленням і замість цього використовує оптичні розгалужувачі для поділу і збору оптичних сигналів при їх переміщенні через мережу. Тож, сплітери не можуть передавати інформацію про збої. Їх складно виявити за допомогою оптичного часового рефлектометра [22]. Пасивна оптична мережа розділяє оптичні волокна для частин мережі. Активне обладнання потрібно тільки у джерела та на приймальній стороні.

Пасивна оптична мережа є найбільш цікавим рішенням, в основному тому, що там не встановлено активне обладнання, що в польових умовах є важливою особливістю для діючих операторів, а також тому, що обладнання та фідерні волокна спільно використовуються користувачами. Застосування технології PON для забезпечення широкосмугового підключення для абонентів в мережі доступу називається волоконно-оптичним з'єднанням FTTx. Залежно від того, як глибоко волокно проникає в першу милу, FTTx може бути класифікований як: FTTB, FTTC, FTTN, FTTP і FTTH.

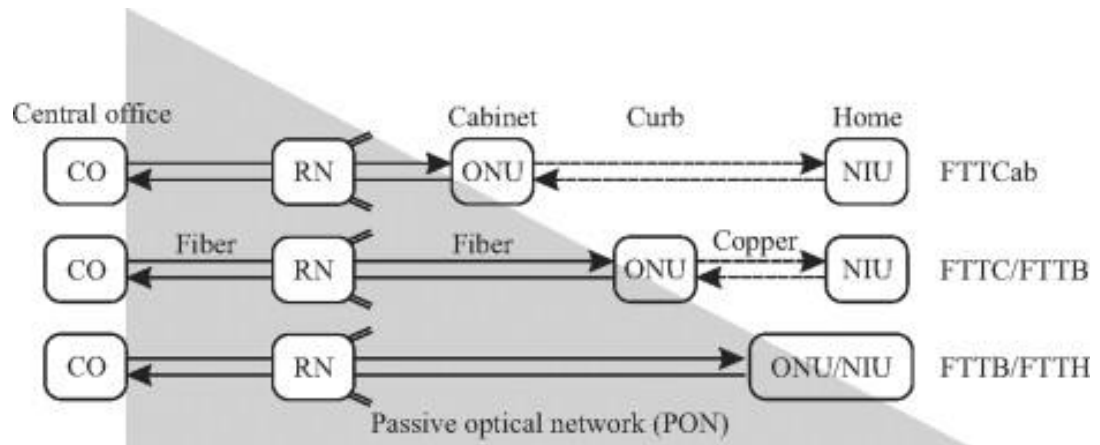


Рис. 2.3 Побудова FTТх

PON використовує одну довжину хвилі в кожному з двох напрямків, довжини хвиль мультиплексовані на одне волокно через WDM. Наприклад, EPON використовує довжину хвилі 1490 нм для низхідної лінії зв'язку, а довжину хвилі 1310 нм – для висхідної. Таким чином, пропускна здатність, доступна в одній довжині хвилі, розподіляється між усіма кінцевими користувачами.

У низхідному напрямку сигнали, що передаються від OLT, досягають пасивного оптичного розділювача і транслюються на всі ONU в PON. Хоча всі ONU отримують всі дані в низхідному напрямку, завдяки радіомовлення встановлюються захищені канали, щоб гарантувати, що кожне ONU відновлює тільки дані, призначені для нього самого. У висхідному напрямку розгалужувач об'єднує всі пакети ONU способом TDM, щоб уникнути колізій у волокні фідера. Отже, кожне ONU повинно обмежувати свою передачу тільки заздалегідь визначеними часовими інтервалами, які адмініструються протоколом MAC, який може статично або динамічно розподіляти тимчасові інтервали між ONU.

У пасивних оптичних мережах OLT подає різні PON таким чином, що даний канал довжини хвилі рівномірно розподілений між ONU в кожен PON. Однак PON не визначають будь-яку динамічну поведінку при розподілі довжин хвиль в мережі, замість цього реалізується повністю статичний розподіл.

Щоб забезпечити виділену смугу пропускання для кожного абонента, дозволяючи віртуальним двоточковим каналам зв'язку між OLT і кожним абонентом, де управління часовим інтервалом не потрібно, PON мультиплексування з поділом по довжині хвилі, були ретельно досліджені як життєздатне рішення для оптичний доступ наступного покоління, що забезпечує також велику безпеку і прозорість протоколів.

PON складається з оптичного терміналу OLT, розташованого в центральній станції (оператора зв'язку), і набору пов'язаних терміналів оптичної мережі ONT або оптичних мережевих блоків ONU поблизу кінцевих користувачів, зазвичай розташованого в приміщенні клієнта. Обидва пристрої вимагають живлення. Замість використання силової електроніки на зовнішній установці використовуються пасивні сплітери і розгалужувачі для поділу смуги пропускання між кінцевими користувачами – зазвичай 64. Максимальна відстань при цьому 10–20 км.

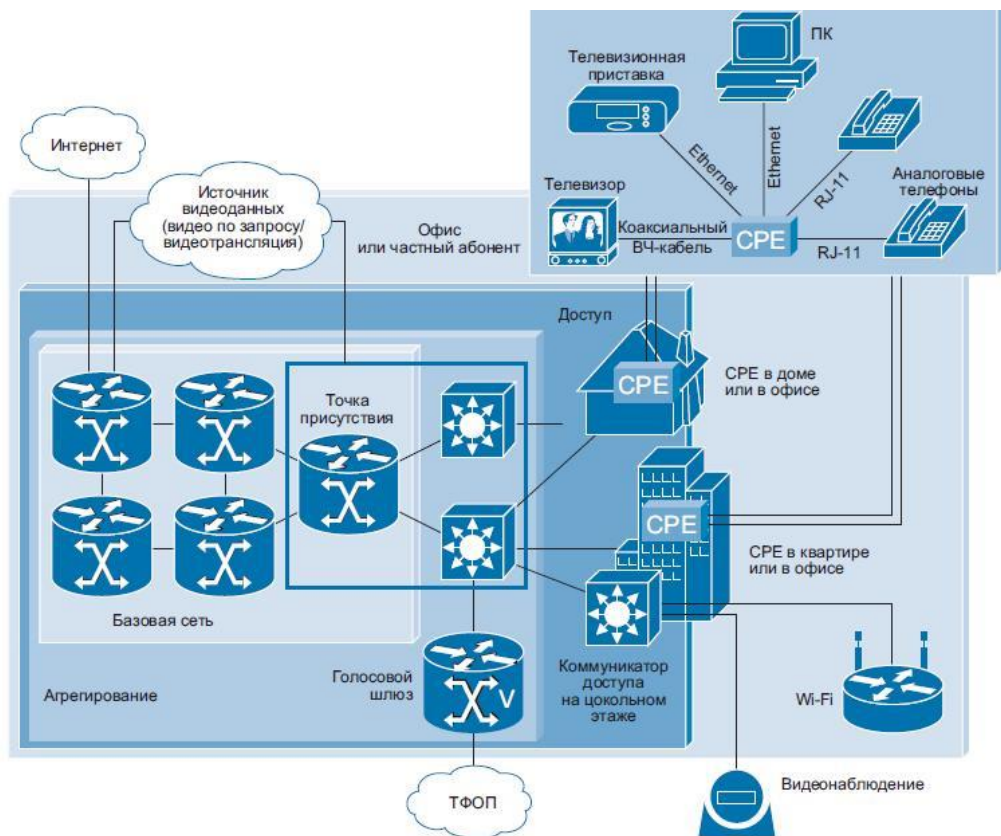


Рис. 2.4 Архітектура мережі PON

OLT встановлюється на стороні провайдера і являється керованим комутатором рівня L2 або L3. Рівень каналу передачі даних або рівень конвергенції передачі (Transmission Convergence, TC layer) складається з трьох різних підрівнів: підрівень кадрів XGTC, підрівень адаптації XGTC PHY і підрівень адаптації служби XGTC [23]. Основна функція рівня TC полягає в забезпеченні мультиплексування між OLT і ONU, за яким ідуть інші функції, такі як адаптація протоколів сигналів клієнтського рівня, операції та обслуговування фізичного рівня (Physical Layer Operation Administration and Maintenance, PLOAM), інтерфейс для динамічного розподілу пропускної здатності (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA), ранжування ONU і реєстрація. Функції XGTC реалізуються через контролери передачі, кожен з яких ідентифікується унікальним ідентифікатором розподілу, призначеним OLT. Підрівень адаптації служби XGTC відповідає за прийом корисного навантаження користувача і форматування їх для передачі через оптичну мережу. В даній системі блоки службових даних, які включають в себе кадри призначених для користувача даних і високорівневі кадри управління PON, передаються в розділі корисного навантаження XGTC з використанням методу XGEM, який підтримує SDU-фрагментацію, інкапсуляцію і розмежування як в низхідному, так і в висхідному напрямках і зазначає окремі порти, щоб вони могли бути прийняті відповідним клієнтом на іншій стороні PON. Підрівень кадрів XGTC відповідає за створення і аналіз полів верхнього рівня як на стороні передавача, так і на стороні приймача. На стороні передавача підрівень кадрів приймає кадри XGEM з підрівня адаптацій служби XGTC і потім створює кадр XGTC низхідного потоку або пакет XGTC висхідного потоку, надаючи вбудовані поля заголовка каналу обміну повідомленнями OAM і PLOAM. На стороні приймача підрівень кадрів приймає кадри XGTC або пакети XGTC аналізують службові поля шляхом вилучення вхідної інформації OAM і PLOAM.

Фізичний рівень визначає фізичні характеристики оптичних приймачів та для стандарту 10G-EPON підрозділяється на шість блоків. MDI визначає характеристики електричних сигналів, які приймаються або передаються на базовий носій. PMD визначає основні механізми обміну потоками даних між середовищем і подрівнем PCS. Нижня частина PMD містить фізичні пристрої, такі як приймач і передавач. Наступним є PMA, який визначає функції, що відповідають за передачу, прийом, відновлення тактового сигналу і вирівнювання фази. PCS визначає набір функцій, які відповідають за перетворення потоку даних, отриманих від GMII, в кодові слова, які потім можуть бути передані через два попередніх рівні у середовище. GMII визначає стандартизований інтерфейс між рівнями MAC і PHY. RS відображає примітивні служби MAC в сигнали GMII, ефективно передає дані в PHY і навпаки. В архітектурі EPON RS також грає ще одну важливу роль: він відповідає за вставку LLID і фільтрацію всіх даних, що передаються з MAC або PHY.

На каналному рівні 10G-EPON в P2P Ethernet обов'язковий рівень багатоточкового управління доступом до середовища (MPC) замінює додатковий подрівень MAC. Протокол багатоточкового управління (MPCP) в свою чергу є частиною рівня MPCP і використовується для управління доступом ONU 10G-EPON до спільно використовуваної середовищі PON. Відзначається, що, незважаючи на той факт, що стеки OLT і ONU дуже схожі, MPCP в OLT грає роль головного, а об'єкт MPCP в ONU діє як підлеглий. MPCP – це протокол, прийнятий для арбітражу передачі по висхідній лінії зв'язку між ONU. Він не включає конкретну схему DBA, але дозволяє реалізувати схеми DBA, полегшуючи обмін інформацією, необхідний OLT для призначення смуги пропускання кожному ONU. MPCP контролює доступ до архітектури топології через повідомлення, статус і таймер. Його основними функціями є розподіл смуги пропускання ONU, опитування запитів смуги пропускання ONU, повідомлення про

перевантаження на верхній рівень, автоматичне виявлення ONU, реєстрація та ранжування. Він включає в себе два 64-байтових керуючих повідомлення MAC, GATE і REPORT.

Він здатний ефективно підтримувати всі функції Ethernet. З іншого боку, XG-PON є більш гнучку парадигму, що включає загальний механізм для будь-якого типу наданого трафіку. Його механізм адаптації досить потужний і здатний агрегувати трафік з кількох джерел, що надходить з декількох мереж.

В 10G-EPON фрейми Ethernet зберігають свій вихідний формат і властивості, пропонуючи гнучку і просту багаторівневу модель. По суті, PON на основі Ethernet виконують наскрізний трафік на основі IP. XG-PON включає в себе всі служби, підключені через Ethernet (безпосередньо або через IP). Це завдання виконується в системах XG-PON.

Кадри TDM і Ethernet формують кадри XGEM, а потім кадри ATM і XGEM інкапсулюються в кадри XGTC.

У PON на основі Ethernet ідентифікатор логічного каналу (LLID) звертається до MAC-адресу ONU з портами OLT. Ця стратегія, також відома як концепція емуляції P2P, з'єднує призначений для користувача і магістральний інтерфейси. З іншого боку, XG-PON використовує змінну T-CONT для адресації кожного ONU. І LLID, і T-CONT надають форму емуляції P2P.

Якщо повернутися до більш ранніх стандартів, то незважаючи на загальну схожість в загальній довжині хвилі передачі і бюджеті оптичного приймача, стандарти GPON і EPON істотно розрізняються за властивостями їх фізичного рівня, що залежить від середовища, рівня ТС, можливостей OAM і рівня MAC [24].

Підсумовуючи можемо порівняти TC Layer та MAC Layer [25].

Protocol Area	ITU	IEEE	
	XG(S)-PON	10G-EPON	P802.3ca
Service identification	GEM Port-ID	LLID	MLID, ULID
US granting unit	Alloc-ID	LLID	PLID, MLID, ULID, or GLID
Physical ONU Address (Pre/Post registration)	SN / ONU-ID	MAC add. / LLID	MAC add. / PLID

Рис. 2.5 Порівняння ідентифікаторів для різних стандартів

OLT має вихідні порти – для з'єднання з зовнішніми джерелами даних та вхідні порти. Оптичні термінали OLT ефективно працюють на дистанціях до 120 км по системі точка-точка, однак найбільш часто максимальна відстань на місцевості не перевищує 20 км, що пояснюється деревовидною структурою мережі, в результаті працює за системою точка-багатоточка.

ONU – активна частина PON, розташована на абонентській стороні. Являє собою, комутатор VLAN з одним оптичним портом і кількома мідними портами 100 Мбіт/с або 1 Гбіт/с.

У пасивній мережі ONT маршрутизатор грає найважливішу роль. Віддалений вузол ONT з Wi-Fi застосовується як клієнтське обладнання в сценаріях FTTH. Цей пристрій має Ethernet і FXS-порти, роз'єм для оптичного кабелю, Wi-Fi для підключення зовнішніх пристроїв.

Якщо необхідно підключити за допомогою іншої технології (Ethernet або VDSL), тоді замість ONT встановлюється ONU. Їх кількість, які можуть бути обслужені одним інтерфейсом OLT, залежить від використовуваної PON-технології і звичайно дорівнює 16, 32 або 64.

ODN – це оптична розподільча мережа. ODN є ділянкою мережі між оптичним лінійним терміналом і оптичним мережевим модулем і включає в

себе магістральну, розподільну і абонентську ділянку кабелю, а також всі необхідні з'єднувачі і пасивні пристрої. До всього іншого, ODN є найважливішим шляхом передачі даних мережі PON, і її якість безпосередньо впливає на продуктивність, надійність, і масштабованість PON. Для прямого оптичного з'єднання приватних будинків сьогодні використовуються в основному пасивні сплітери [26].

Тож оптична розподільча мережа складається з магістрального оптичного фідера, сплітерів, що розподіляють оптичний сигнал, кінцевих відвідних абонентських кабелів залежно від типу кінцевого абонентського пристрою і кількості каскадів сплітерів на мережі.

## 2.2 Варіанти архітектури мережі PON та NG-PON

У напрямку низхідного потоку дані від OLT передаються всім ONT мережі, так як сплітери розділяють світловий потік, що надійшов до порту. Потім ONT відфільтровують призначені їм пакети. У висхідному напрямку усунення колізій виконується за рахунок протоколів арбітражу на основі TDMA. У протоколах вже реалізовані функції управління смугою пропускання, якістю обслуговування та інші можливості.

Розглядаючи принцип дії GPON використання одного волокна досягається за рахунок WDM: ONT передає на довжині 1310 нм, OLT – на 1490 нм.

Ще одна довжина хвилі, 1550 нм, може використовуватися для передачі відеосигналу в смузі радіочастот, такого ж, як в мережах кабельного телебачення. Незважаючи на те, що IP-відео може надати більш багатий набір послуг, перевага використання накладеного відеосигналу пов'язана з рентабельним запозиченням досягнень кабельного мовлення [27].

Залежно від топології оптоволоконної системи мережеві архітектури PON можуть бути дешевше при великомасштабному розгортанні.

Існують такі варіанти топології: зірка, дерево та шина.

Зірка – проста для побудови топологія. Для поділу потужності сигналу вона використовує сплітер, який розділяє всю потужність вхідного сигналу порівну між абонентами [28]. При цьому від оператора до сплітера вся інформація проходить тільки по одному волокну. Це і є "вузьке місце" даної топології. В даному випадку необхідно прийняти рішення щодо резервування. Таким чином, волокна для резерву будуть знаходитися в різних кабелях.

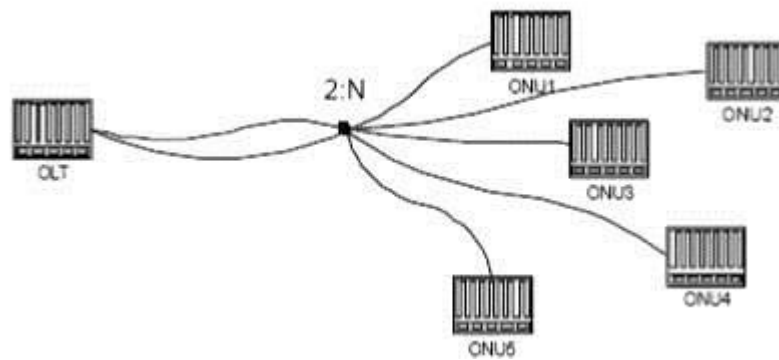


Рис. 2.5 Топологія «зірка»

Топологія «шина» в основному передбачає застосування сплітерів з невеликою кількістю виводів. Коефіцієнт ділення потужності може бути різним, що дозволяє забезпечити у всіх приблизно однакову вхідну потужність сигналу не враховуючи віддаленість оператора до абонентів.

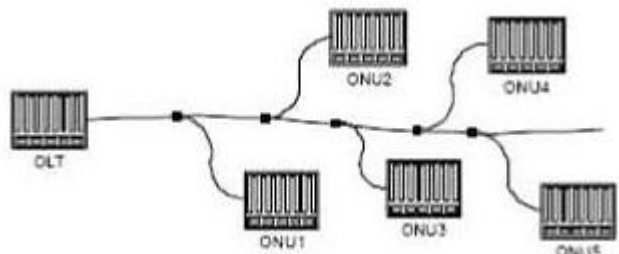


Рис. 2.6 Топологія «шина»

Топологія «кільце» дозволяє вирішити і питання резервування, тому як напрямок сигналу йде від оператора можна змінювати в залежності від місця

пошкодження. Разом з тим, для підвищення надійності можна провести додаткове резервування, з'єднавши деякі вузли кільця між собою. Для підвищення надійності складні мультиплексні мережі, що використовують дану логічну топологію, роблять з використанням фізичної топології «подвійне кільце». Загалом працює перше кільце, при пошкодженні каналу або обладнання активізується друге кільце.

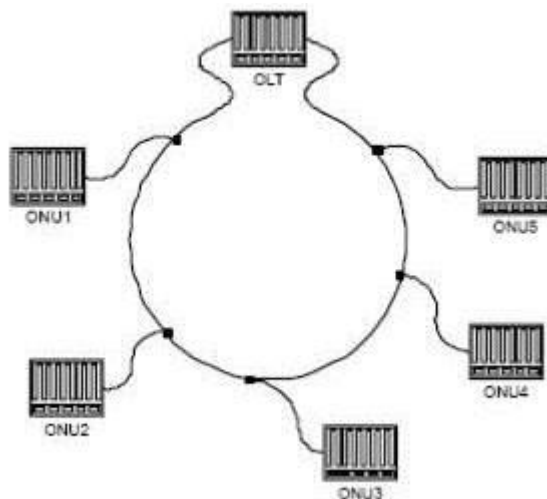


Рис. 2.7 Топологія «кільце»

Розглянемо більш складний варіант побудови мережі. «Дерево» побудоване на базі топології «зірка», в кожному вузлі якої знаходиться ще один сплітер. Таким чином, схема складається з каскадів, в кожному з яких відбувається розподіл потужності на кілька напрямків. Переваги і недоліки подібні до вищевказаної «зірки». Резервування відбувається за тими самими принципами [29].

Також використовуються такі топології: точка-точка, кільце, точка-багатоточка.

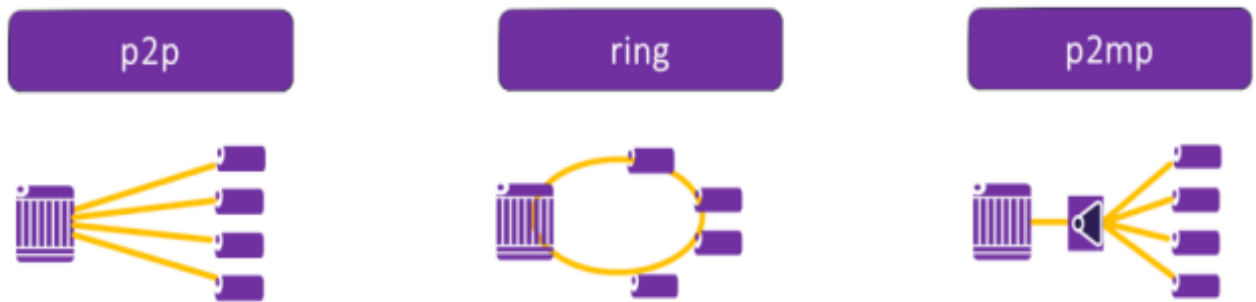


Рис. 2.8 Топології P2P, Ring, P2MP

Перевагами P2P топології є не тільки мінімальна вартість клієнтського обладнання, але вона також надає всі можливості для покращення мережі, що забезпечує високу швидкість передачі даних. Ця топологія може бути застосована для будь-якого стандарту. При цьому складність при виявленні збоїв буде нижчою. Інформаційна безпека клієнтів залишається на високому рівні, що важливо для корпоративних клієнтів.

Оптичний кабель необхідно прокласти до кожного клієнта, тому топологія є найбільш дорогою. З цього випливає один з основних недоліків.

При розгляді топології P2MP бачимо, що в цьому випадку використовується деревоподібна мережу без активних вузлів, яка являється вдалим вибором при побудові мережі для багатоквартирних житлових будинків. Вона є простою не тільки в підключення нових абонентів, а й у обслуговуванні. Також можна врахувати економію кабельної інфраструктури через зменшення кількості ОВ. Проте наявна несумісність обладнання різних вендорів. На відміну від топології «точка-точка» динамічний діапазон менший. Обсяг корисної інформації зменшується за рахунок шифрування усіх потоків даних [30].

З цих трьох архітектур P2MP виявилася найбільш популярною серед операторів для розгортання FTTx, оскільки вона зазвичай знижує витрати на інфраструктуру. У топології P2MP за рахунок оптимізації розміщення розгалужувачів можна досягти значної економії оптичних волокон і

зниження вартості кабельної інфраструктури. Абонентські вузли не впливають на працездатність мережі в цілому. Підключення, відключення або вихід з ладу одного або декількох абонентських вузлів ніяк не позначається на роботі інших [31]. За топології точка-багатоточка немає необхідності у розгортанні одного виділеного ОВ від СО до клієнта, тому що наявний пасивний розподільчий одноступінчастий або каскадний комплекс.

Залежно від вищевказаних топологій буду використовувати топологію точка-багатоточка, так як вона забезпечує широкосмуговий доступ з можливістю модернізації мережі для використання нових додатків та простоту підключення нових абонентів, враховуючи її економічну привабливість та майбутні потреби у пропускній здатності..

Пропускна здатність PON кожного порту OLT ділиться залежно від кількості ONT на канал. Для даної архітектури P2MP доступна пропускна здатність буде набагато вища, ніж у AON.

### **2.3 Комбіновані оптичні мережі з використанням WDM**

З появою недорогих оптичних компонентів PON, що використовують технологію мультиплексування з поділом по довжині хвилі, стали мережами оптичного доступу наступного покоління. У WDM-PON кожне ONU обслуговується виділеним набором довгохвильових каналів для зв'язку з OLT. ONU може використовувати виділену ширину смуги, яка також масштабується відповідно до своїх потреб. Таким чином, ємність системи та гнучкість мережі можуть бути значно збільшені. Проте, при використанні традиційних PON-архітектур, які мають обмежену функцію захисту, будь-яка відмова компонента або волокна може привести до величезної втрати даних або навіть до бізнесу. Тому питання живучості мережі приваблює більше уваги в останні роки. Абоненти тепер виконують запити на служби та

з'єднання високої доступності. Таким чином, заходи захисту для підвищення живучості мережі вкрай бажані для забезпечення стійкості до збоїв, наприклад, у випадках можливих катастрофічних подій, таких як пожежі чи повені.

Але з усіх технологій, що використовують пасивну волоконну архітектуру, жодна з них не володіє такими технічними та перспективними перевагами, як WDM-PON. Як виняток, WDM-PON виділяє довжину хвилі для кожного ONT, включаючи до 32 довжин хвиль. Кожна з цих довжин хвиль використовується для передачі і прийому інформації, пов'язаної з її відповідним ONT. Оптика WDM-PON налаштовується на відповідний «колір» світла або використовує динамічне призначення каналу або довжини хвилі, оскільки ONT ранжуються на OLT.

Типова архітектура WDM-PON ущільнення каналів з поділом по довжині хвилі показана на рисунку 2.9. Мультиплексор та демультимплексор з поділом по довжині хвилі використовується в ODN [32]. У прикладі на рисунку використовуються ґратчасті хвильові решітки, так як типова архітектура WDM-PON буде замінювати пасивні сплітери на хвильові селективні фільтри, які часто реалізовані як решітка на основі масиву хвилеводів. В результаті отримуємо всі переваги архітектури PON.

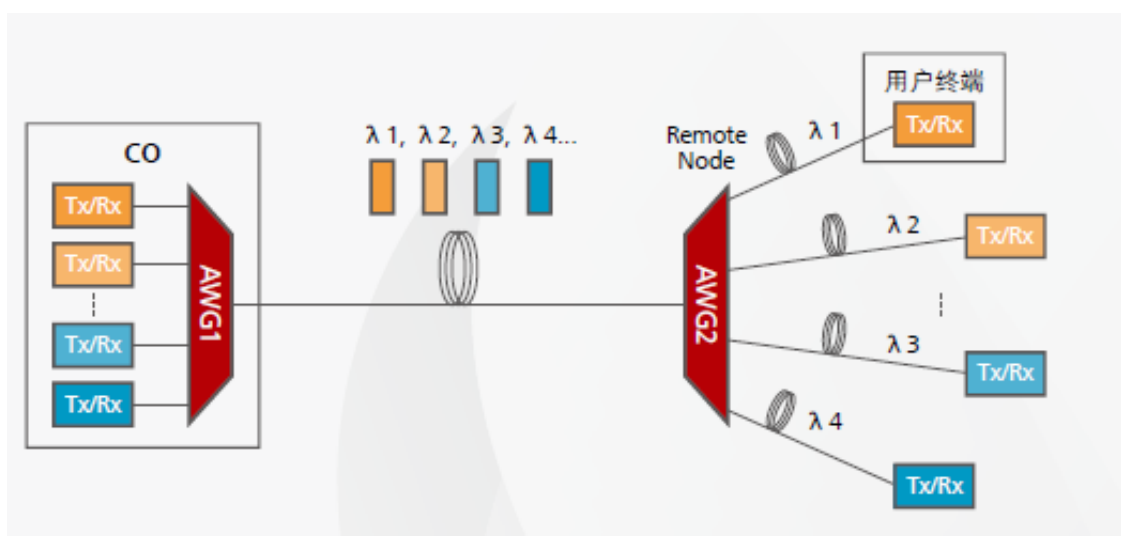


Рис. 2.9 Типова WDM-PON система

Передача сигналу в WDM-PON аналогічна передачі P2P. Різниця між цими двома системами полягає в тому, що WDM-PON заснований на ізоляції різних довжин хвиль на одному і тому ж оптичному волокні. Кожен ONU в WDM-PON володіє виключно ресурсами смуги пропускання довжини хвилі. Іншими словами, WDM-PON має логічну топологію P2MP, як показано на рисунку 2.10.

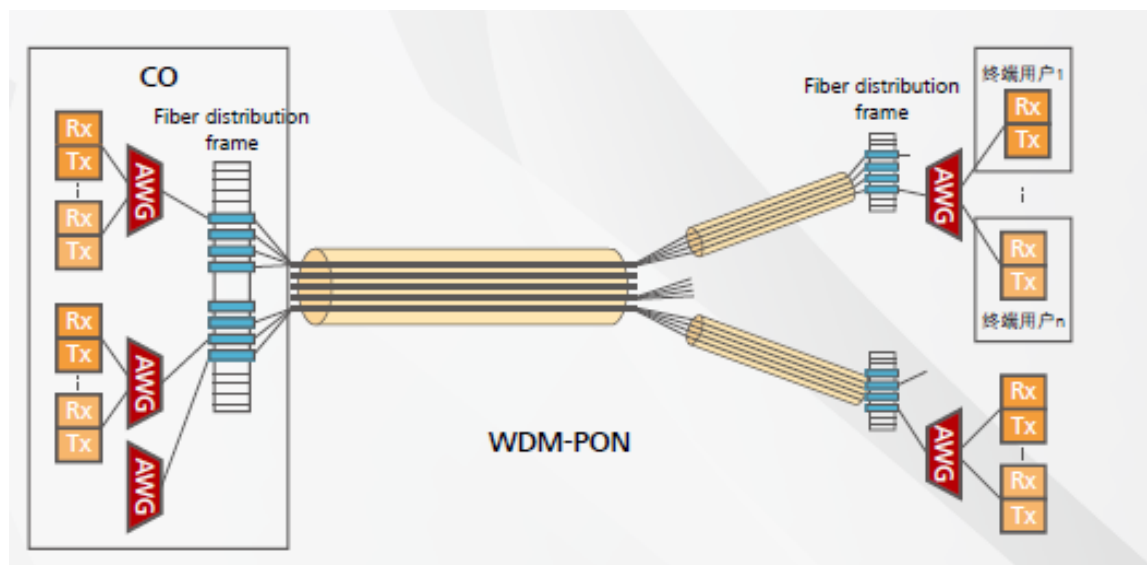


Рис. 2.10 Топологія WDM-PON мережі

До переваг WDM-PON можна віднести те, що користувачу надається виділена смуга, сигнали абонентів фізично ізольовані, ефективно використовується волокно, можливе значне збільшення дальності зв'язку за використання AWG з низькими втратами замість неефективних з точки зору втрат сплітерів при стандартному для GPON бюджеті в 28 дБ, можна підключати абонентів на відстані близько 80 км. Проте основний недолік WDM-PON – висока вартість, так як потрібні вузькосмугові передавачі, що випромінюють на заданій довжині хвилі. Це особливо критично для абонентських пристроїв, так як їх вартість безпосередньо впливає на вартість абонентської лінії. З одного боку, проблема частково вирішується за рахунок уніфікації та зменшення типів апаратних компонент в кінцевих пристроях (налаштування лазерів на задану хвилю), з іншого – через кілька років до

моменту виходу стандарту вартість оптичних компонент для WDM-PON буде значно нижче нинішнього рівня [33].

Розробка технології WDM-PON покликана вирішити питання з обмеженням кількості виділяемого трафіку. З введенням даних стандартів збільшиться швидкість до абонента і кількість абонентів, що підключаються на один порт. З особливостей можна виділити те, що середній час затримки у десятки разів менше за гігабітну пасивну мережу. Вплив розкиду довжин ліній на середній час затримки передачі пакетів не підвищується з ростом кількості абонентів, включених в сегмент WDM-PON, так як відсутній часовий розподіл доступу. Найменший вплив коефіцієнту варіації інтервала обслуговування на середній час затримки передачі пакетів в зворотньому каналі досягається при використанні технології WDM-PON через відсутність тривалого процесу доступу і малій величині інтервалу обслуговування [34].

Існує декілька концепцій, щодо того, як WDM-PON може бути реалізований в NG-PON2.

Зовнішньо-затравний WDM-PON, за допомогою якого широкосмугове джерело світла на головному кінці спектрально нарізається в ODN і розподіляється по ONU. Основна перевага цього підходу полягає в тому, що він добре зрозумілий і вже використовується комерційними системами. Потенціал пропозиції послуг зі швидкістю понад 1 Гбіт/с менш зрозумілий і буде виходити за рамки поточних можливостей системи. Комерційно доступні системи також вимагають використання  $\lambda$ -розгалужувача, і робота з ODN на основі розділювача потужності дуже складна для бюджету каналу.

Повторне використання довжини хвилі WDM-PON дозволяє використовувати одну довжину хвилі на ONU для висхідного та для вхідного напрямку передачі. Це забезпечується повторним використанням довжини хвилі низхідного потоку для передачі у висхідному напрямку шляхом повторної модуляції в передавачі на основі відбиваючого напівпровідникового підсилувача.

Переналаштовуваний WDM-PON з використанням традиційних DWDM модулів, що переналаштовуються. Ці модулі змінюються шляхом видалення термоелектричних охолоджувачів і блокувальників хвиль з модулів для зниження витрат. Налагодження та калібрування передавача виконується з використанням спільно використовуваного блокувальника хвиль на основі OLT. У низхідному напрямку в ONU потрібні переналаштовувані приймачі для забезпечення безкольорової роботи.

Ультра-щільний когерентний WDM-PON використовує прогрес в когерентній передачі і цифровій обробці сигналів. Дуже щільно розташовані канали у 3 ГГц обираються шляхом когерентного виявлення. Це забезпечує переваги як високої селективності, так і дуже чутливого приймача. Кожен користувач отримує 1 Гбіт/с з використанням певної диференціальної квадратурної фазової маніпуляції, модульованої довжини хвилі. Через складність трансмітера і приймача, розробки в області фотонної інтеграції вважаються необхідними для того, щоб зробити це економічно ефективним і практичним для реалізації.

Самозатравний WDM-PON відкидає широкосмугове джерело світла і вихідне світло ONU генерується самостійно з використанням відбивача, розміщеного в загальному порту сплітера. Ця схема має серед переваг простоту, але для її роботи потрібна наявність  $\lambda$ -розгалуджувача, і існують обмеження по довжині кабелю між перехідником і ONU [35].

### **Висновки:**

У даному розділі були проаналізовані активні та пасивні оптичні мережі наступного покоління.

В залежно від топології оптоволоконної системи були запропоновані різні архітектури PON при великомасштабному розгортанні. По кожній архітектурі визначено основні переваги та недоліки.

Окрім цього висвітлено питання щодо передачі даних у оптичних мережах, тобто рівні та відповідні ідентифікатори, що дозволяють визначити оптимальний принцип роботи мережі з хвильовим поділом.

## РОЗДІЛ 3. СПОСОБИ МОДЕРНІЗАЦІЇ NG-PON2

### 3.1 Аналіз підсилювачів для модернізації системи

В ідеальному випадку кожний ONU є безбарвним, так як воно не має певної фіксованої довжини хвилі в висхідному напрямку і є досить гнучким, щоб можна було використовувати будь-яку кількість різних значень довжини хвилі.

Існує декілька підходів у впровадженні цього безбарвного ONU у мережах з WDM.

При поділі спектра в ONU використовується джерело світла з досить широким оптичним спектром. У так званій спектральній нарізці може бути застосований світловипромінювальний діод з поділом спектра (Spectrum-Sliced Light-Emitting Diode, SSLED). Фільтри використовуються для вибору довжини хвилі несучої передачі ONU, але їх розміщення в ONU як і раніше вимагає різних компонентів для кожного клієнтського обладнання. Більш практичний підхід полягає в тому, щоб використовувати фільтр довжини хвилі для об'єднання сигналів від різних ONU. Функція фільтра довжини хвилі вибирає, яка довжина хвилі передається в OLT для кожного ONU. Основна проблема з поділом спектра полягає в тому, що важко досягти достатньої оптичної потужності для передачі у висхідному напрямку на кожній довжині хвилі.

Деякі з них включають в себе елементи, що переналаштовуються в ONU. Наприклад переналаштовуємі лазери. Хоч вони дуже гнучкі це є достатньо дорогою технологією в мережі доступу. У разі реалізації системи з таким лазером одночасно може використовуватися тільки одна довжина хвилі, а доступна в даний час смуга пропускання не буде відповідати вимогам модернізації у даній роботі.

Розглянемо рефлексивний підхід. Несучі призначаються кожному ONU. В цьому обладнанні відбивається та модулюється сигнал. Можна виділити два підходи: направити неперервний сигнал на хвилі вихідного сигналу OLT на додаток до низхідного сигналу на його власній довжині хвилі. Другий спосіб полягає в тому, що ONU модулює сигнал спадного потоку, який він отримує, щоб створити сигнал висхідного потоку. Останній підхід можливий, коли швидкість передачі даних в висхідному напрямку нижче, ніж в низхідному напрямку. Перевага в тому, що для фільтрації в мережі потрібно вдвічі менше лазерів на OLT.

Серед пристроїв виділяю відбиваючі напівпровідникові оптичні підсилювачі (Reflective Semiconductor Optical Amplifier, RSOA) та відбиваючі модулятори з електропоглинанням (Reflective Electro Absorption Modulators, REAM). Перевагою останнього є інваріантність по довжині хвилі, але він зазнає високих внутрішніх втрат.

Тому роблю вибір на вивченні напівпровідникових оптичних підсилювачах. Загалом це є SOA, в якому один або кілька торців оптичної камери не відбивають.

Одним з типів реалізації є пряма модуляція RSOA. Цей підхід є відносно простим, хоча продуктивність може бути обмежена тривалим терміном служби оптичних носіїв. Інша реалізація полягає в тому, щоб мати оптичний модулятор поглинання на одному кінці камери і відбивну поверхню на іншому кінці.

Лазери на основі оптичного резонатора з відбиваючим напівпровідниковим оптичним підсилювачем представляють собою безбарвні, самоналаштовувані і безпосередньо модульовані джерела для PON. Вони включають в себе RSOA в ONU в якості активного елементу, розподільчого волокна в якості лазерного резонатора, хвилеводного гратчастого маршрутизатору і загального відбиваючого дзеркала, розташованими на віддаленому вузлі.

RSOA грає потрібну роль підтримки коефіцієнта посилення резонатора, модуляції сигналу, що передається через його струм зміщення і знебарвлення рециркуляційної модуляції всередині резонатора, тому його конструкція є фундаментальною для роботи самозатравного передавача.

Дані підсилювачі вже використовуються в якості безбарвних модуляторів в WDM-PON. Крім того, вони обіцяють не тільки виступати в цій ролі, а й виступати в якості безбарвних лазерних джерел, якщо в якості лазерного резонатора використовується магістраль оптоволоконної мережі. До теперішнього часу RSOA в основному використовувалися в якості зовнішньо затравних широкосмугових передавачів. У цих передавачах RSOA модулює світло, яке бере початок з іншої точки в мережі. І хоча загальне зовнішнє широкосмугове затравочне джерело показало хороші результати, швидкість таких схем обмежена шумом биття посиленого спонтанного випромінювання (Amplified Spontaneous Emission, ASE) і хроматичної дисперсією (chromatic dispersion, CD) із-за широкого спектру. Крім того, вони вимагають потужних і широкосмугових джерел світла, що робить їх економічно неефективними. В якості альтернативи було запропоновано самозатравочні передавачі WDM-PON на основі RSOA для усунення зовнішнього затравного джерела. У початкових реалізаціях самозатравних джерел використовувалися механізми зворотного зв'язку, включаючи волоконні бреггівські решітки. Ці методи вимагають окремих і точно налаштованих компонентів, виборчих по довжині хвилі, в кожному ONU, що запобігає безбарвну роботу і збільшує складність і вартість.

В даний час досліджується декілька безбарвних схем передавачів. Найпростіша і найбільш економічна схема використовує RSOA як джерело посилених спонтанних випромінювачів (Amplified Spontaneous Emission, ASE) в схемі з поділом спектра. Вихідний сигнал безпосередньо модулюється на ASE RSOA. Схема є недорогою та простою. Обмеженнями

цієї схеми є високі втрати на фільтрацію і чутливість до хроматичної дисперсії через широкий оптичний спектр.

Вони найдоступніші наразі. Широкопasmові джерела світла з прямою модуляцією, такі як світлодіоди та вищезазначені RSOA можуть використовуватися для передачі у висхідному напрямку. Ці дані безпосередньо кодуються в широкопasmовому ASE RSOA, який розміщується в ONU. Маршрутизатор з хвилеводними ґратами (Waveguide Grating Router, WGR) в RN розрізає модульований спектр ASE, передаючи тільки призначені піддіапазони від кожного ONU в центральний офіс. Спектральний діапазон вихідного потоку від кожного ONU визначається портом WGR, до якого підключені окремі ONU. Низька вартість світлодіодів робить цю схему привабливою, але є обмеження швидкості модуляції у 1 Гбіт/с на 10 км. Шум амплітуди ASE та шум високої відносної інтенсивності є обмежувачими факторами. Існує також висока втрата потужності фільтрації під час спектрального зрізу.

Згодом була введена економічно ефективніша та простіша топологія мережі, яка включає в себе самозатравочні лазери з внутрішнім резонатором RSOA. Оптичний резонатор утворений розподільною мережею між відбиваючою гранню RSOA і дзеркалом на віддаленому вузлі (Remote Node, RN). Посилення резонатора забезпечується RSOA, тоді як маршрутизатор з хвилеводними ґратами на RN автоматично вибирає робочу довжину хвилі. WGR не тільки обмежує смугу пропускання RSOA-FCL, але також дозволяє автоматично призначати довжину хвилі, яка легко масштабується, так що багато користувачів в мережі можуть передавати інформацію з наперед визначеною довжиною хвилі.

Розробка недорогих безбарвних джерел є актуальною темою для досліджень. Вони необхідні для того, щоб забезпечити широке поширення пасивних оптичних мереж. Безбарвна функція RSOA-FCL заснована на автоматичному та пасивному автоматичному налаштуванні довжини хвилі їх

випромінювання тільки за допомогою фільтра WDM, розташованого на віддаленому вузлі. Безбарвність дозволяє масово виробляти і встановлювати ідентичні вищеразміщені пристрої на всіх оптичних мережевих пристроях. Крім того, пасивний розподіл довжини хвилі інфраструктурою PON спрощує процес управління довжиною хвилі. Таким чином, доступність недорогих безбарвних джерел, дозволяє реалізувати WDM-PON, які пропонують високу пропускну здатність.

Використання зовнішньо-затравних RSOA забезпечує більш високу досяжність і швидкість при більш високих інвестиціях. Ідея полягає в тому, щоб використовувати групу лазерів в центральному офісі, по одному для кожного ONU, які посилають безперервний сигнал в низхідному напрямку. WGR розділяє і розподіляє хвилі різних довжин за відповідними ONU. RSOA в свою чергу підсилюють і безпосередньо кодують дані неперервна хвилю і відправляють їх назад в висхідний потік. Посилення безперервного світла вхідного потоку RSOA компенсує втрату потужності передачі, пропонуючи більш високий бюджет потужності лінії. Порушення хроматичної дисперсії для цієї схеми також більш ослаблене, ніж для схеми з поділом спектра.

Зовнішньо затравний RSOA володіє найвищою, але такий підхід є найдорожчим. У центральному офісі встановлено декілька лазерів, по одному на кожне ONU. У ONU відбувається підсилення світла і кодування вихідного сигналу. На сьогодні досягнута швидкість 20 Гб/с за рахунок використання цього елемента. Однак в обох випадках керована фільтрація зсувів за допомогою фільтра WDM або додаткового інтерферометра з затримкою на лінії, що робить систему чутливою до будь-якого дрейфу довжини хвилі. Крім того, додаткові лазери на стороні провайдера збільшують вартість і споживання енергії.

Продовжуючи дослідження необхідно виявити чи є більш економічний спосіб, ніж схема із зовнішньо-затравним RSOA, який забезпечить кращу продуктивність.

Розглянемо самозатравний передавач RSOA-FCL. Для цього випадку немає необхідності у додаткових лазерних джерелах. Як видно з назви, розсіяне світло і є тим, що випромінює сам підсилювач. Дзеркало в RN відбиває частину випускається підсиленою спонтанною емісією назад. Це значно знижує вартість. RSOA в ONU і дзеркало в RN утворюють резонансну порожнину, яка вбудована в розподільну магістраль. Довжина хвилі випромінювання лазера автоматично налаштовується портом WGR, до якого підключений ONU. Лазерні характеристики призводять до більш вузького спектру, більш низької інтенсивності шуму (Relative Intensity Noise, RIN) і більш високої потужності в порівнянні зі схемою ASE з поділом по спектру, таким чином покращуючи характеристики передачі.

Розглянемо топологію пасивної оптичної мережі RSOA-FCL. Топологія мережі доступу WDM-PON з центральним офісом, що підключається через RN і ONU через розподільні волокна, побудована по принципу точка-багатоточка. ONU складається з WGR в С-діапазоні для вихідного напрямку та L-діапазоні для вхідного. RSOA служить активним середовищем резонатора, який утворений обертальним дзеркалом Фарадея (Faraday Rotator Mirror, FRM) на RN та дзеркалом RSOA. Мультиплексор у віддаленому вузлі діє як частотно-виборчий фільтр, через який лазер самоналаштовується на конкретний порт підключення WGR.

Іншим економічно ефективним джерелом є самозатравний підсилювач з волоконно-резонаторними лазерами (Reflective Semiconductor Optical Amplifier-Fiber Cavity Lasers, RSOA-FCL). Вони застосовуються для каналів на основі пасивних оптичних мереж ущільнення каналів з поділом по довжині хвилі. Необхідно виконати порівняння з іншими безбарвними джерелами, а саме з посиленням спектром спонтанного випромінювання та зовнішньо-затравні RSOA. RSOA-FCL є економічно ефективним джерелом висхідного потоку WDM-PON, запозичуючи простоту і рентабельність зі

зрізу спектра ASE з характеристиками, які в багатьох випадках мають досить хороші показники для передачі на короткі відстані.

Схема RSOA-FCL є кращою за схему зрізу спектра ASE. Завдяки простій архітектурі і низькій вартості RSOA-FCL пропонує велику потужність, більш низьке RIN, більш вузький спектр і більше відношення сигнал/шум. Інша відмінність між RSOA-FCL полягає в оптичному діапазоні, який є більш вузьким у порівнянні з оптичним спектром ASE.

Схема з зовнішньо-затравлений підсилювачем забезпечує додаткове SNR у 5 дБ. Однак, застосовуються дорогі додаткові лазери.

RSOA-FCL є економічно ефективним рішенням з ефективністю між джерелами з розрізом спектра ASE і зовнішньо затравленими джерелами.

Принцип роботи RSOA-FCL закладається у трьох функціях – це пряма модуляція, посилення, придушення модуляції.

RSOA у резонаторі повинен виконати такі операції для правильного функціонування всієї системи: посилення повинно компенсувати загальні втрати в резонаторі; RSOA повинен пропонувати достатню ширину смуги модуляції; залишкова модуляція на оптичному полі в вихідному тракті резонатора повинна бути нелінійно пригнічена після повернення в RSOA, щоб забезпечити чисту несучу для нової передачі даних в вихідному напрямку. Правильно спроектовані RSOA здатні запропонувати три вищезгадані функції одночасно.

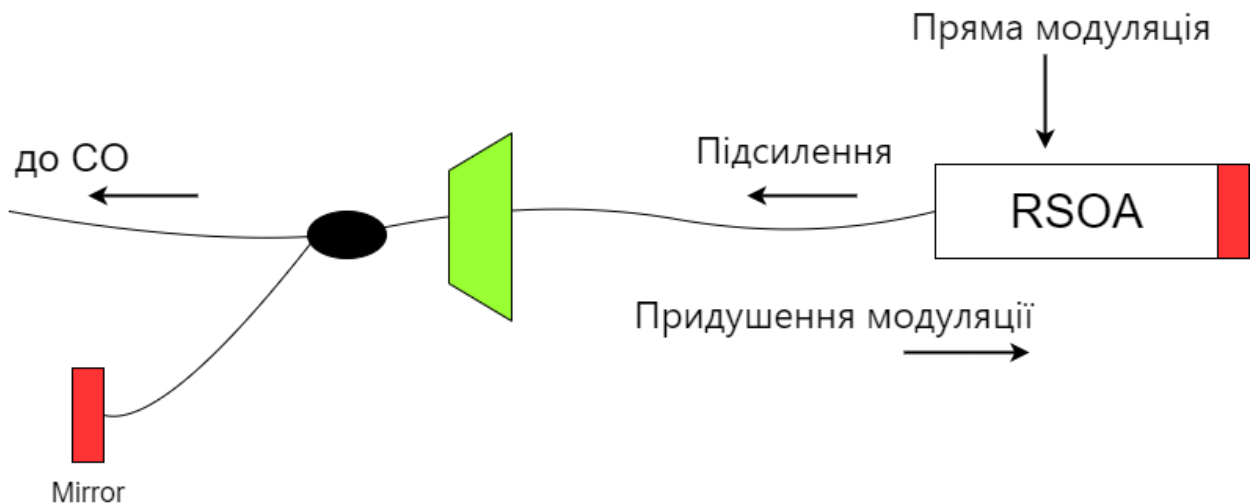


Рис. 3.1 Функції RSOA

Статичні характеристики RSOA мають дві області: лінійну область, де вхідний і вихідний потужності лінійно пов'язані (коефіцієнт посилення плоский), і нелінійну область, де вихідна потужність не змінюється при збільшенні вхідної потужності (посилення пригнічується при більш високій вхідній потужності).

Нелінійне придушення вхідного сигналу розглядається більш докладно на лінійних та нелінійних областях відношень вхідної потужності до вихідної потужності та підсилення. У лінійній області підсилувач забезпечує відносне постійне посилення, так що вхідна потужність і вихідна потужність мають лінійну залежність. У нелінійній області посилення зменшується при більшій вхідній потужності. Також спостерігається, що вхідний сигнал або лінійно посилюється, якщо його вхідна потужність слабка, або нелінійно пригнічується, якщо його вхідна потужність сильна. Таким чином, щоб RSOA-FCL придушував вхідний сигнал, відбитий вхідний сигнал повинен бути в нелінійній області RSOA.

Отже, підсилувач використовується в якості модулятора для кодування даних вихідного потоку в оптичному полі. Також діє як секція посилення волоконного резонатора Фабрі-Перо і повинен компенсувати втрати в

порожнині, щоб здійснити лазерне випромінення. Він нелінійно пригнічує залишкову відбиту модуляцію на вхідному відбитому світлі.

Для всіх рефлексивних підходів оптична мережа повинна бути ретельно спроектована, для того, щоб мінімізувати відбиття вхідного сигналу, що іде до користувацького обладнання. Інакше відбиття провокує появу шуму у приймачі.

За розглянутими концепціями, що стосуються того, як може бути впроваджений WDM-PON роблю висновок, що RSOA-FCL, який характерний простотою та вищими передавальними характеристиками, кращий для модернізації.

### 3.2. Варіант застосування RSOA-FCL у мережі WDM

На рисунку 3.2 представлена запропонована архітектура з використанням обраного підсилювача.

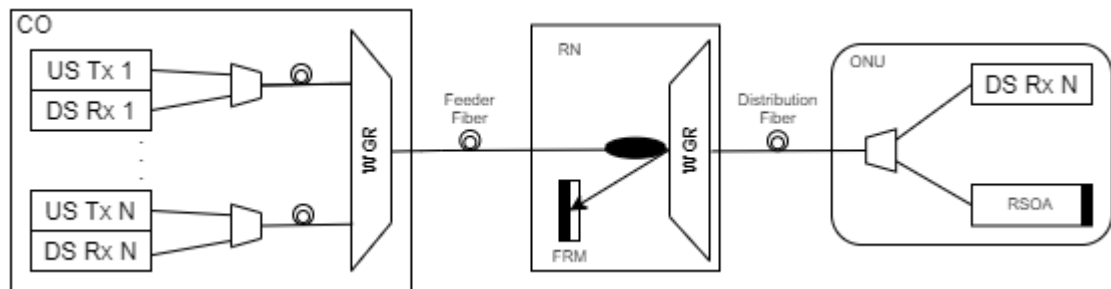


Рис. 3.2 Пропонована архітектура WDM-PON на базі RSOA-FCL

Світловий потік з довжиною хвилі  $\lambda_x$ , що випромінюється лазером проходячи через WRG, об'єднується зі світловими потоками від інших лазерів і у вигляді сумарного сигналу, що містить довжини хвиль передається на віддалений вузол.

Сумарний сигнал розділяється мультиплексором WDM на  $k$  компонентних сигналів за кількістю лазерів на приймальній стороні за

кількістю блоків ONU. Світловий потік з довжиною хвилі  $\lambda_x$  по лінії зв'язку передається в ONU. Мультиплексор WDM направляє світловий потік з довжиною хвилі  $\lambda_x$  в оптичний порт приймача.

До складу обладнання оператора входять приймачі та передавачі, які під'єднані до роутера з передачею у C та L діапазонах, у якому працює NG-PON2. Через фідерне волокно вищевказаний блок з'єднується з віддаленим вузлом. У ньому розміщене поворотне дзеркало Фарадея. Виріб розроблений для оптоволоконних мереж та вимірювальних додатків. В будь-якій точці вздовж волокна SOP прямої та зворотної оптичної хвилі завжди ортогональні один одному, незалежно від подвійного променезаломлення волокна. Це і є особливістю даного пристрою, який заснований на ефекті Фарадея, в якому відбувається зворотне обертання стану поляризації при проходженні через спеціальне оптичне середовище під магнітним полем. FRM складається з волоконного коліматора, ротатора Фарадея і дзеркала.

Через високу поляризаційну залежність коефіцієнта посилення RSOA стабільні характеристики та високий коефіцієнт прийому-передачі мають бути отримані завдяки FRM, розташованому у віддаленому вузлі і спільно використовуватися всіма ONU, і FR, розміщеними на виході RSOA.

RSOA в даному випадку являється активним середовищем резонатора волоконного лазера, який утворений дзеркалом RSOA з одного боку і обертовим дзеркалом Фарадея на RN з іншого боку. Циклічний мультиплексор WGR в RN діє як частотно-виборчий фільтр, через який лазер самоналаштовується на конкретний порт підключення WGR. Крім того, RSOA дозволяє кодувати призначені для користувача вихідні дані прямим модуляція струму введення RSOA.

Обертач Фарадея і RN в резонаторі необхідні для забезпечення генерації, навіть коли RSOA повинен мати деяку залежність посилення поляризації

Можна виділити найбільш поширені класи по конструкції резонатора: кільцеві резонатори та Фабрі-Перо.

В цьому випадку дзеркало поміщається в RN за фільтром WDM. Це встановлює механізм зворотного зв'язку з підсилювачем для формування резонансного підсилювача Фабрі-Перо.

Оптичний смуговий фільтр імітує WGR-фільтр та має супергауссовський розподіл, виконує вибір частоти, тоді як змінний оптичний атенюатор представляє сумарні вносимі втрати усіх пасивних складових резонатору. Тобто, атенюатор використовується для контролю потужності висіву.

Ротатор Фарадея і FR-дзеркало розміщені в ONU і RN, відповідно, для контролю поляризації в RSOA-FCL. Ці елементи необхідні, оскільки RSOA часто має посилення, залежне від поляризації. ONU підключається до RN і CO через розподільче волокно DF і фідерне волокно FF.

Робоча довжина хвилі RSOA-FCL кожного ONU визначається портом фільтра WDM, до якого він підключений. Таке пасивне призначення довжини хвилі випромінювання спрощує управління довжиною хвилі. До сих пір RSOA-FCL показував передачу до 10 Гбіт/с.

Для більш детального вивчення розглянемо варіанти проектування клієнтського блоку та блоку на стороні провайдера.

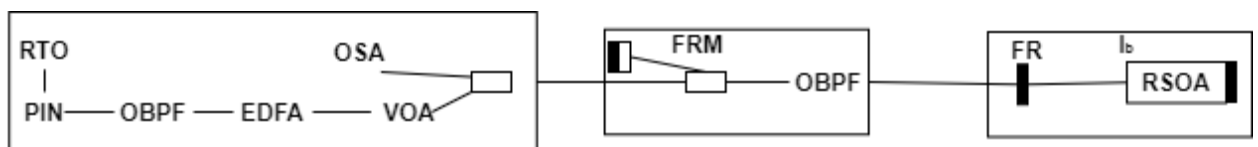


Рис. 3.3 Детальний опис структури OLT

У клієнтському терміналі струм зміщення  $I$  управляє RSOA.

У центральному офісі для моделювання розміщуються VOA, EDFA, OBPF та фотодіод. Розгалужувач 80/20 посиляє 20% потужності в

аналізатор оптичного спектру для контролю сигналу. Регульований оптичний атенюатор використовується для управління введенням потужності.

Оптичний сигнал виявляється фотодіодом, який безпосередньо підключений до осцилографу реального часу записує електричний сигнал після фотодіода. Прилад має чутливість при ймовірності помилки еталонної чутливості BER. Осцилограф записує сигнал.

Характеристики, які необхідно задавати даному підсилювачу при моделюванні: диференційне підсилення, внутрішня втрата розсіювання, коефіцієнт розширення довжини лінії, коефіцієнт нелінійного підсилення, радіаційна рекомбінація, коефіцієнт інверсії, кількість мод, втрата зв'язку RSOA, чутливість фотодіоду, затухання у волокні, пропускна здатність у волокні, дзеркальна відбивна здатність, центральна частота. Для початку пропонується моделювання з одномодовим волокном.

Оптичний сигнал перетвориться в електричний сигнал з використанням PIN-фотодіода і фільтрується за допомогою електричного фільтру Бесселя для зменшення шуму.

### **3.3. Моделювання RSOA**

У цьому підрозділі розглядається загальна математична реалізація моделі RSOA-FCL. Представлена двонаправлена багатомодова модель RSOA біжучої хвилі. Також представляється модель для пасивного резонатора, який складається з оптичного волокна і оптичного смугового фільтра. В результаті вони об'єднуються в єдину систему RSOA-FCL.

Модель RSOA заснована на реалізації SOA. RSOA розбивається на  $n$  просторових ділянок, зображених на рисунку 3.2. Поширення оптичного поля описується в рівняннях біжучої хвилі. Для створення поля генерації

RSOA-FCL, яке самовизначається з ASE, а також для точного врахування насичення посилення RSOA необхідно розглянути ASE.

Рівняння швидкості для щільності носія таке ж, як і для SOA:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{eV} - (R_{se} + R_{st}) \quad (3.1)$$

де  $N$  – щільність носія,  $I$  – прикладений струм,  $e$  – електронний заряд,  $V$  – об'єм активної області посилення RSOA.  $R_{se}$  виражає швидкість виснаження носіїв через процеси рекомбінації і відповідно  $R_{st}$  являє собою виснаження носіїв через викликану рекомбінацію, яка пропорційна щільності фотонів і посиленню середовища.

$$R_{se} = \frac{N}{T} = A_1 N + A_2 N^2 + A_3 N^3 \quad (3.2)$$

де  $T$  – час життя щільності носія,  $A_1$  – нерадіаційна швидкість рекомбінації,  $A_2$  – коефіцієнт радіаційної рекомбінації,  $A_3$  – коефіцієнт шнекової рекомбінації.

$$R_{st} = \frac{(|E^+|^2 + |E^-|^2 + e^+ + e^-) \Gamma a (N - N_0)}{wdfh (1 + e_n P_t)} \quad (3.3)$$

де  $a$  – коефіцієнт диференціального посилення,  $h$  – стала Планка,  $f$  – частота випромінення,  $e_n$  – коефіцієнт стиснення нелінійного підсилення,  $w$  – ділянка активної області, а  $N_0$  – щільність носіїв при прозорості.

Хвильове рівняння для зустрічного розповсюдження сигнальних полів записується у вигляді:

$$\frac{\partial E}{\partial z} \pm \frac{1}{v_g} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{E}{2} ((1 - (i\alpha - \gamma)) \frac{\Gamma a (N - N_0)}{(1 + e_n P_t)}) \quad (3.4)$$

де,  $v_g$  – групова швидкість,  $\gamma$  – внутрішня втрата розсіювання активної області,  $\alpha$  – коефіцієнт Генрі. Оскільки поле генерації поширюється в межах спектральної ширини не більше 100 ГГц усередині ОБПФ, то  $\alpha$  – стала. Таке припущення дозволяє досить точно моделювати SOA. Рівняння для поля ASE має вигляд

$$\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{(\Gamma a(N - N_0) - \gamma)e}{2} + R_{sek}(N) \quad (3.5)$$

В рівнянні (3.5) перший доданок визначає посилення ASE при його поширенні.

$$R_{sek}(N) = \left(\frac{x_1 + ix_2}{\sqrt{2}}\right) \sqrt{\Gamma n_s a(N - N_0) M \Delta \nu_{FSR} f_k h \Delta z} \quad (3.6)$$

Передбачається, що спонтанне випромінювання поводить як білий гауссовського шум.  $x_1, x_2$  – Гаусові розподілені послідовності випадкових чисел.  $n_s$  – коефіцієнт інверсії і  $f_k$  – частота k-ї моди ASE. Спонтанне випромінювання розраховується в діапазоні частот  $M \Delta \nu_{FSR}$ , де  $\Delta \nu_{FSR}$  – вільний спектральний діапазон, а  $M$  являється цілим числом.

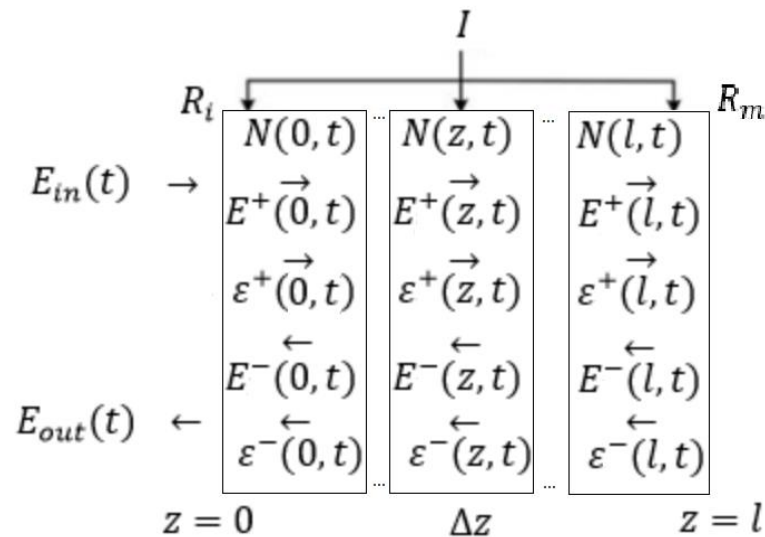


Рис. 3.2 Схема моделювання RSOA, в яких просторово дозволені зустрічні сигнали, поля ASE і щільність несучих

Для подання поширення сигналу і ASE, час  $t$  і положення  $z$  змінюються з кроком зазначеним у формулах (3.7) та (3.8)

$$\Delta z = \frac{l}{m} \quad (3.7)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{v_g} \quad (3.8)$$

де  $l$  – довжина активної області RSOA з ефективним показником заломлення  $n_g$ .  $v_g = \frac{c}{n_g}$  – групова швидкість, де  $c$  – швидкість світла у вакуумі. Щільність носіїв чисельно вирішується з використанням модифікованого методу Ейлера.

На виході застосовуються такі граничні умови і відображають межі RSOA показані на рисунку 2.

$$\begin{aligned} E^+(0, t) &= \sqrt{R_l} E^-(0, t) + \sqrt{\xi(1-R_l)} E_{in}(t) \\ E^-(L, t) &= \sqrt{R_m} E^+(l, t) \\ e^+(0, t) &= \sqrt{R_l} e^-(0, t) \\ e^-(L, t) &= \sqrt{R_m} e^+(l, t) \end{aligned} \quad (3.9)$$

$E_{in}(t)$  – поле входу для моди,  $R_l$  – коефіцієнт відображення потужності виходу,  $R_m$  – дзеркальна грань.  $\xi$  показує зв'язок волокна до RSOA. Вихідний сигнал і ASE представлені:

$$\begin{aligned} E_o(t) &= \sqrt{\xi(1-R_l)} E^-(0, t) \\ e_o(t) &= \sqrt{\xi(1-R_l)} e^-(0, t) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Загальна довжина резонатора включає в себе розподільче волокно та RSOA. Частотна характеристика волокна, що припускає тільки дисперсію і загасання групової швидкості:

$$H_f(\nu) = e^{(-0,11\beta + j\pi D \frac{\lambda^2}{c} (\nu - \nu_0)^2)L} \quad (3.11)$$

де  $\beta$  – загасання волокна,  $D$  – параметр хроматичної дисперсії і  $\lambda$  – середня довжина хвилі. У ОБРФ має гаусівську форму. З об'єднання частотної характеристики фільтра Гаусса і загасання VOA отримуємо:

$$H_{OBPF}(\nu) = \beta e^{-\frac{(2(\nu-\nu_0))^{2n} \ln 2}{2w}} \quad (3.12)$$

$w$  – смуга пропускання 3 дБ,  $n$  – порядок фільтра Гауса,  $\beta$  – затухання VOA.

ASE і сигнал лазера, які передаються в мережу виражені в рівнянні (3.13).

$$\begin{aligned} E_o(t) &= \sqrt{\xi_{cp}} (H_f(\nu) H_{OBPF}(\nu) E_o^-) \\ e_o(t) &= \sqrt{\xi_{cp}} (H_f(\nu) H_{OBPF}(\nu) e_o^-) \end{aligned} \quad (3.13)$$

де  $\xi_{cp}$  – відношення вихідної потужності.  $E_o$  – перетворення Фур'є вихідного сигналу,  $e_o$  – ASE з RSOA.

Вільний спектральний діапазон виражається формулою (3.14).

$$FSR = \frac{c}{2(n_o L + n_g l)} \quad (3.14)$$

де  $n_o$  – показник заломлення оптичного волокна. Ми вводимо  $M$  як ціле число мод, пов'язаних разом і для яких вирішується одне рівняння. Частоти сигналу визначаються як:

$$f_k = f_0 \pm kMFSR \quad (3.15)$$

де  $f_0$  – центральна частота.

### Висновки:

Виявивши, що існує проблема у економічному покращенні системи було прийняте рішення застосування безбарвних абонентських пристроїв, які повинні мати можливість відправляти і приймати сигнали на будь-який із зазначених довжин хвиль та володіють широкосмуговим посиленням та можливістю прямої модуляції. Визначившись з тим, який підсилювач буде вигіднішим по зазначеним у роботі факторам: вартість та складність впровадження, провели моделювання підсилювача та визначили схему з даними для моделювання пасивної мережі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У першому розділі я розглянула види оптичного волокна та явища, які виникають у ньому. Також визначено побудову волоконно-оптичних ліній зв'язку. Розглянула усі етапи розвитку стандартів та обрала пасивну оптичну мережу нового покоління за її відповідність вимогам майбутнього. Мною запропоновано використання комбінованих оптичних мереж з мультиплексуванням з розділенням по довжині хвилі. Бо спектральне ущільнення каналів має переваги: здатність значно збільшувати пропускну здатність каналу, при цьому вона дозволяє використовувати вже запропоновані волоконно-оптичні лінії, можливість організації двосторонньої багатоканальної передачі трафіку по одному волокну. Обладнання WDM застосовується для удосконалення та розширення існуючих мереж, що значно підвищує їх пропускну здатність і доступність. З часом пропускну здатність мережі значно збільшується і зміна набору наданих послуг відбувається без заміни оптичного кабелю.

Проаналізувавши методи для зниження вартості ONU прийнято рішення моделювання безбарвного ONU, розмістивши відбиваючий напівпровідниковий оптичний підсилювач в передачу вихідної лінії зв'язку. У цій роботі представлена математична модель для RSOA FCL як безбарвного передавача для доступу WDM-PON наступного покоління.

Таким чином, самозатравні RSOA-FCL є багатообіцяючими безбарвними джерелами для передачі доступу з необхідною швидкістю при роботі з належним управлінням хроматичної дисперсії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Konstadinidis C., P Sarigiannidis, P Chatzimisios. A multilayer comparative study of XG-PON and 10G-EPON standards - arXiv preprint arXiv:1804.08007, 2018, P.268.
2. Козаннэ А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. Оптика и связь. Оптическая передача и обработка информации, – Москва: Мир, 1984. – 504 с.
3. Принцип передачи света по оптоволокну / [Электронный ресурс]. URL: <http://izmer-ls.ru/w/o02.html>
4. Оптоволокну / [Электронный ресурс]. URL: <http://fitm.nusta.edu.ua/mediawiki/index.php?title=Оптоволокну>
5. Убайдуллаев Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2001. 267 с.
6. Хвилевідна оптика. Волоконно-оптичні лінії та системи передавання / [Електронний ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/5461664/page:51/>
7. Integrated Services Digital Network / [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\\_Services\\_Digital\\_Network](https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_Services_Digital_Network)
8. Синхронная цифровая иерархия / [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Синхронная\\_цифровая\\_иерархия](https://ru.wikipedia.org/wiki/Синхронная_цифровая_иерархия)
9. TDM / [Электронный ресурс]. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/TDM>
10. Jose A Altabas, Samael Sarmiento, Jose A Lazaro. Passive optical networks: Introduction, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2018, P. 6
11. Технология TDMA / [Электронный ресурс]. URL: <https://lanmarket.ua/stats/tehnologiya-TDMA>
12. Ll. Gutierrez, P. Garfias, M. De Andrade, C. Cervello-Pastor and S. Sallent Next Generation Optical Access Networks: from TDM to WDM. 2010

<https://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunications-technologies/next-generation-optical-access-networks-from-tdm-to-wdm>

13. ITU-T Recommendation G.984.1, Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics, 2003.
14. Current and Future FTTH Technologies / [Електронний ресурс]. URL: <http://article.sapub.org/10.5923.j.jwnc.20170702.02.html>
15. Pandelis Kourtessis, Carlos Almeida, Ching-Hung Chang, Jiajia Chen, Silvia Di Bartolo, Peter Fasser, Maurice Gagnaire, Erich Leitgeb. Evolution of optical access networks, Towards Digital Optical Networks, 2009. P. 97-131
16. Satyanarayana Katla, Abhinov Balagoni Technological and Cost based Analysis of Future-Proof Fiber Access Passive Networks: GPON and WDM PON – arXiv preprint arXiv: 1308.5356, 2013, P.268.
17. Большаков Ю.Є. Міжнародні стандарти (ITU-T, IEEE). Форсайт (Foresight): наукове передбачення, стратегії і управління: збірник матеріалів міждисциплінарної науково-практичної конференції. Київ. 2017 р. С. 31-33
18. Іванов В.І. Застосування технології WDM в сучасних мережах передачі інформації навчальний посібник, 2010, С. 6
19. Next-Generation PON: Eliminating physical constraints from the access network / [Електронний ресурс]. URL: [https://www.calix.com/content/dam/calix/marketing-documents/public/Calix\\_Technical\\_Brief\\_NG-PON2.pdf](https://www.calix.com/content/dam/calix/marketing-documents/public/Calix_Technical_Brief_NG-PON2.pdf)
20. E. Wong. Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies, J. Lightwave Technol., №4. 2012. P. 597–608
21. AON vs PON – A comparison of two optical access network technologies and the different impact on operations, 2008, p. 9.
22. Гасымов И. Официальный документ Cisco: Архитектура оптических сетей доступа FTTH – URL: <http://masters.donntu.org/2010/fkita/gordiienko/library/article3.htm>

23. Effenberger, F., Mukai, H., Kani, J.-i., Rasztoivits-Wiech, M.: Next-Generation PON – Part III: System Specifications for XG-PON. IEEE Communications Magazine. 2009. P.47.
24. Leonid G. Kazovsky. Broadband Optical Access Networks. 2011. P. 300
25. PON TC Layer/MAC Layer Specification Comparison / [Електронний ресурс]. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/20180127/Documents/3.%20Duane%20Remein.pdf>
26. Pachnicke S., Eiselt Michael H., Grobe K., and Elbers J.-P. The Frontiers of Optical Access Networks. International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). 2015. P. 4
27. Горнак А. Новые горизонты PON. Технологии и средства связи. 2009. № 4. С. 5
28. Балашов В.О. Проектування та експлуатація сучасних мереж широкопasmового доступу: навч. посіб. для дипломного проектування та магістерських робіт. / , Лашко А.Г., Ляховецький Л.М., Орешков В.І. / – Одеса: РВЦ ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019. – 267 с.
29. Архитектура PON. Преимущества и недостатки / [Електронний ресурс]. URL: [https://fibertop.ru/architecture\\_PON.htm/](https://fibertop.ru/architecture_PON.htm/)
30. Большаков Ю.Є. Волоконно-оптичні мережі широкопasmового абонентського доступу (ШСАД). Форсайт (Foresight): наукове передбачення, стратегії і управління: збірник матеріалів міждисциплінарної науково-практичної конференції. Київ. 2017 р. С. 40–42
31. The Future of Passive Optical Networking is Here (MU-437) / [Електронний ресурс]. URL: <http://masters.donntu.org/2010/fkita/gordiienko/library/article3.htm>
32. Cedric F. Lam. Passive optical networks: Principles and practice, 2007, p. 368

33. Сергеев Н., Белятко А. WDM PON как следующее поколение пассивных оптических сетей. Телекоммуникационные системы и сети: материалы 51-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Минск: БГУИР, 2015. - С. 45
34. Next Generation PON Evolution, Huawei Technologies Co. 2010. P. 24
35. Nettet D. NG-PON2 technology and standards. Journal of Lightwave Technology. 2015. №33. P. 1136-1143