

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

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційно-комунікаційних технологій та систем

«На правах рукопису»
УДК 621.396

«До захисту допущено»

ВО завідувача кафедри

_____ Аліна МОШИНСЬКА

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: « Дослідження побудови мереж доступу за технологією WDM-PON»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ТС-з11мп

Тельчарова Діана Олександрівна _____

Керівник:

Доцент кафедри ІКТС, к. т. н., доц.

Григоренко О.Г. _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІБ НН ФТІ, к.т.н., доц.

Рєпа Ф. М. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційно-комунікаційних технологій та систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (освітня програма) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка» («Системи та мережі електронних комунікацій»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

ВО завідувача кафедри

_____ Аліна МОШИНСЬКА

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студентці
Тельчаровій Діані Олександрівні

1. Тема дисертації « Дослідження побудови мереж доступу за технологією WDM-PON », науковий керівник дисертації Григоренко Олена Григорівна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студенткою дисертації 09.12.2022

3. Об'єкт дослідження є пасивні оптичні мережі доступу.

4. Предмет дослідження є побудова мереж доступу на основі технології WDM-PON.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: завданнями роботи є

- 1) Проаналізувати технології WDM-PON і XG-PON та визначити можливості збільшення пропускної здатності, оцінити параметри та особливості застосування цієї технології для побудови мереж доступу;
- 2) Провести також порівняння цих двох технологій та визначити їх переваги при побудові мереж доступу, обґрунтувати вибір технології WDM-PON для побудови широкосмугових мереж доступу і модернізації існуючих і оцінити її переваги при застосуванні;
- 3) Запропонувати варіанти застосування обладнання різних виробників для побудови мереж за цими технологіями.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Слайд №1 «Тема роботи»

Слайд №2 «Мета дослідження, актуальність теми, предмет та об'єкт дослідження»

Слайд №3 «Переваги фізичного середовища - оптичного волокна»

Слайд №4 «Технологія WDM-PON»

Слайд №5 «Технологія XG-PON»

Слайд №7 «Порівняння технологій»

Слайд №6 «Обладнання XG-PON»

Слайд №7 «Висновки»

7. Дата видачі завдання 01.10.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	01.09.2021-31.01.2021	Вик.
2	Визначення об'єкту, предмету, мети	25.09.2021-20.12.2021	Вик.
3	Написання першого розділу «Обґрунтування перспективності побудови мереж ширококутового доступу на основі оптичного волокна»	22.12.2021-27.02.2022	Вик.
4	Написання другого розділу. Проаналізувати технологію WDM-PON та визначити можливості збільшення пропускної здатності, оцінити параметри та особливості застосування цієї технології для побудови мереж доступу; Проаналізувати технологію XG-PON та визначити можливості збільшення пропускної здатності, оцінити параметри та особливості застосування цієї технології для побудови мереж доступу.	30.03.2022-15.05.2022	Вик.
5	Написання третього розділу. Провести порівняння цих двох технологій та визначити їх переваги при побудові мереж доступу ; Провести порівняння варіантів застосування обладнання різних виробників для побудови мереж за цими технологіями.	17.05.2022-22.08.2022	Вик.
7	Написання висновків і остаточне оформлення роботи	18.09.2022-31.10.2022	Вик.
8	Виготовлення графічного матеріалу	05.09.2022-30.11.2022	Вик.
9	Попередній захист роботи	03.12.2022	

Студентка

Діана ТЄЛЬЧАРОВА

Науковий керівник дисертації

Олена ГРИГОРЕНКО

РЕФЕРАТ

Випускна робота містить 97 сторінок, 38 ілюстрацій, 16 таблиць. Було використано 28 джерел.

Мета роботи – дослідження технологій WDM-PON та XG-PON щодо пропускної здатності та інших параметрів. А також у оцінці особливостей та переваг цих технологій при побудові мереж доступу.

В результаті дослідження було проаналізовано перспективність побудови мереж ширококутового доступу на основі оптичного волокна, визначення можливості збільшення пропускної здатності, параметри та особливості застосування цих технологій для побудови мереж доступу. Було проведено порівняння технологій та визначення їх переваг при побудові мереж доступу а також порівняння варіантів застосування обладнання різних виробників для побудови мереж за цими технологіями.

Ключові слова: ширококутова мережа доступу, технологія WDM-PON , технологія XG-PON, оптичне волокно, пропускна здатність.

ABSTRACT

The graduation work contains 97 pages, 38 illustrations, 16 tables. 28 sources were used.

The purpose of the work is to study WDM-PON and XG-PON technologies in terms of bandwidth and other parameters. And also in the assessment of features and advantages of these technologies when building access networks.

As a result of the study, the prospects of building broadband access networks based on optical fiber, the determination of the possibility of increasing bandwidth, the parameters and features of the application of these technologies for the construction of access networks were analyzed. A comparison of technologies and determination of their advantages in the construction of access networks was carried out, as well as a comparison of options for the use of equipment from different manufacturers for the construction of networks based on these technologies.

Keywords: broadband access network, WDM-PON technology, XG-PON technology, optical fiber, bandwidth.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	9
1 ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ НА ОСНОВІ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА ..	14
1.1 Оптоволоконні технології широкосмугових мереж доступу.....	14
1.2 Волоконно оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ).....	18
1.3 Еволюція волоконно-оптичних систем зв'язку	21
1.4 Перспективність ВОЛЗ	26
1.5 Характеристики та переваги оптичних волокон	34
1.6 Висновки до розділу 1	45
2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ WDM-PON ТА XG-PON	47
2.1 Принципи пасивних оптичних мереж	47
2.2 Технологія WDM PON	50
2.3 Технологія XG-PON	62
2.4 Висновки до розділу 2	75
3 ПЕРЕВАГИ ТЕХНОЛОГІЙ WDM-PON ТА XG-PON ПРИ ПОБУДОВІ МЕРЕЖ ДОСТУПУ	77
3.1 Характеристики WDM-PON та XG-PON та їх порівняння	77
3.2 Сценарії розгортання наступного покоління PON.....	82
3.3 Обладнання нокія для пасивних оптичних мереж та його застосування	84
3.4 Оптичний лінійний термінал ZTE ZXА10 С300.....	87
3.5 Висновки до розділу 3	92
ВИСНОВКИ.....	93
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AN – Access Node – вузол доступу

AWG – Arr ayed waveguide grating – хвилеводні решітки з матрицею

CG – Channel Group – канална група – набір пар каналів (CP), що передаються через спільне волокно

CP – Channel Pair – канална пара

CPRI – Common Public Radio Interface – загальнодоступний радіоінтерфейс

CT – Channel Termination – термінація каналу

CW – continuous wave – безперервної хвилі

CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing – грубе спектральне мультиплексування

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне спектральне мультиплексування

EDFA – Erbium Doped Fibre Amplifier – волоконно-оптичний підсилювач на оптичному волокні, легovanому іонами ербію

FTTH – Fiber To The Home – доведення волокна до квартири

HFC – Hybrid Fiber -Coaxia – гібридні волоконно-коаксіальні технології

LWP – Low Water Peak – одномодове волокно з низьким водяним піком

NZ DSF – Non-zero dispersion-shifted fiber – волокно зі зсувом ненульової дисперсії

ODN – Optical Distribution Network – оптична розподільча мережа

OLT – Optical Line Termination – оптичний лінійний термінал

ONT – Optical Network Terminal – оптичний мережевий термінал

ONU – Optical Network Unit – оптичний мережевий (лінійний) блок

PMD – Physical Medium Dependent – рівень, залежний від фізичного середовища

PMD – Polarization mode dispersion – дисперсія поляризаційно-модова

PON – Passive Optical Network – пасивна оптична мережа

R/S – Receive/Send – опорні точки прийому/передачі на стороні ONU

RBD – Reliability Block Diagram – блок-схеми надійності

S/R – Send/Receive - опорні точки передачі/прийому на стороні OLT

SDH – Synchronous Digital Hierarchy – синхронна цифрова ієрархія

SNI – Service Node Interface – інтерфейс сервісного вузла

TDM – Time Division Multiplexing – мультиплексування з поділом за часом

UNI – User Network Interface – інтерфейс користувач-мережа

VCSEL – Vertical-cavity surface-emitting laser – поверхнево випромінювальні лазери з вертикальним резонатором

WDM – Wavelength Division Multiplexing – мультиплексування за довжиною хвилі

WR – Wavelength Router – маршрутизатор, що маршрутизує за довжинами хвиль

WR-ODN – Wavelength Routed ODN – розподільча мережа, що виконує маршрутизацію за довжинами хвиль

WRP – WR-ODN based WDM PON system – система пасивної оптичної мережі на основі технології WDM з розподільною мережею WR-ODN

ВСТУП

З кожним роком галузь телекомунікацій розвивається все стрімкіше й стрімкіше. Кожного дня з'являються тисячі нових застосунків та нових послуг. Оператори телекомунікаційних послуг та розробники програмного забезпечення намагаються швидко реагувати на зростаючі потреби споживачів. Такий стрімкий розвиток передбачає постійного збільшення пропускної здатності телекомунікаційних мереж, зокрема мереж доступу. Досягти такого збільшення можна або будуючи нові мережі, які будуть задовольняти вимогам на даному етапі розвитку суспільства, або модернізуючи існуючі мережі, впроваджуючи на них інноваційні високоефективні технології та нове обладнання.

На сьогоднішній день в сегменті мереж доступу представлена велика кількість ефективних технологій широкопasmового доступу, провідних і безпроводних. Але безперечно найбільш широкопasmовими, завадостійкими, надійними та високоефективними є мережі доступу на основі оптичного волокна. Вони мають найбільшу смугу пропускання і здатні передавати в секунду терабіти інформації. Тому дослідження побудови мереж доступу за оптичними технологіями є дуже актуальною задачею. Практична цінність та новизна теми дослідження полягає у розгляді використання технології WDM-PON для мереж доступу, тому що раніше технологія мультиплексування за довжиною хвилі використовувалася лише в транспортних телекомунікаційних мережах.

За сторіччя для комунікації використовувалися три медіатехнології. Одним із таких широко розповсюджених середовищ передавання, який спочатку використовувався для доставки по аналоговій телефонній лінії до приміщень абонентів, був мідний кабель. Він також використовується для передачі цифрових даних у технології DSL (Digital subscriber line). Завдяки кабельному телебаченню оператори почали доставляти телевізійні сигнали в різні будинки з головної антени (головної станції), розміщеної в цьому районі, за допомогою коаксіального кабелю. Концепція була відома як телевізійна система спільної антени (CATV). Ця технологія в даний час еволюціонувала до такого стану, що кабель здатний не

тільки передавати телевізійні сигнали для супутника, але також може підтримувати голосові та телефонні послуги.

Крім того, еволюція призвела до широкосмугової мережі, в якій поєднуються оптичне волокно та коаксіальний кабель. Ця мережа відома як гібридна волоконно-коаксіальна система (HFC). Деякі з помітних переваг оптичного волокна в мережі полягають у тому, що порівняно з коаксіальним кабелем воно демонструє дуже низькі втрати сигналу та високу електромагнітну стійкість. Виходячи з цього, сигнали можна ефективно транспортувати на дуже великі відстані без необхідності підсилення. Отже, це можна перевести на кращу якість, підвищену надійність і нижчі експлуатаційні витрати. Крім того, результатом еволюції є FTTH (Fiber To The Home). Було помічено, що коли оператор переходить з мережі HFC або мережі з витою парою на FTTH, можна досягти приблизно 75–95% економії операційних витрат [18].

Для надання послуг «потрійного доступу» (тобто голосу, даних і відео) через одне з'єднання постачальники широкосмугових послуг використовують різні конкуруючі технології для ефективного надання послуг. Однак кожна з існуючих технологій має відповідні обмеження щодо надійності системи, вартості, пропускної здатності та покриття. Технологія на основі оптичного волокна має різні властиві переваги, які є дуже перспективними для ефективного надання послуг. Таким чином, це робить оптоволоконну технологію домінантною та не має собі рівних серед інших сучасних широкосмугових технологій. Незважаючи на це, відбулися помітні розробки в інших конкуруючих технологіях. Отже, вони змогли задовольнити постійно зростаючі вимоги до пропускної здатності.

Як зазначалося раніше, впровадження технологій фіксованого широкосмугового зв'язку залежить від прямого фізичного з'єднання між мережею оператора та будівлею абонента. Низка широкосмугових технологій, як цифрова абонентська лінія (xDSL), кабельний модем і широкосмуговий доступ через лінії електропередач (BPL), значно розвинулася та використовує поточну форму абонентського підключення. Наприклад, системи кабельних модемів

базуються на існуючих мережах кабельного телебачення HFC. Крім того, у системах xDSL використовуються традиційні виті мідні пари, які використовуються для голосових послуг у службі звичайного телефону (POTS). А лінії електропередач, що живлять будинок або квартиру абонента, використовуються за технологією VPL для надання широкосмугових послуг. З іншого боку, залежно від конфігурації мережі, система FTTx вимагає додаткового встановлення та підключення оптоволокна від центрального офісу (CO) прямо до або поблизу від абонента. Ця вимога робить розгортання системи FTTx відносно дорогим.

Провайдери кабельного телебачення широко впроваджують комунікаційні засоби. Мережа в основному складається з коаксіальних кабелів, які зазвичай розгортаються між центральною точкою (оптичним вузлом) і будинками. Крім того, ряд оптичних вузлів підключено до головної частини через оптоволокно. Таким чином, HFC-мережа оператора кабельного телебачення є комбінацією коаксіального кабелю та оптоволокна. Слід зазначити, обмеження пропускної здатності мережі HFC є в основному результатом використання коаксіального кабелю.

Механізм контролю доступу до фізичного середовища HFC MAC може базуватися на стандартах Multimedia Cable Network System Partners Limited (MCNS) або IEEE 802.14. Крім того, DOCSIS MCNS є стандартом де-факто в кабельній промисловості. Наприклад, у Сполучених Штатах кабельні компанії обслуговують величезну кількість абонентів широкосмугового зв'язку, приблизно на 40% більше, ніж абонентів оптоволокна та DSL. Цю тенденцію в основному можна пояснити помітною неспинною еволюцією кабельних технологій [18].

У 2013 році компанія Cable Television Laboratories, Inc. (CableLabs) оголосила про оновлені специфікації DOCSIS 3.1. Крім того, у 2017 році CableLabs завершила свою специфікацію Full Duplex DOCSIS 3.1 із покращеною ємністю та підтримкою симетричних мультигігабітних сервісів. Еволюція принесла значне вдосконалення, яке змінило сигнал від QAM з однією несучою

(SC-QAM) до мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM). Крім того, були прийняті модуляції вищого порядку до 4096 QAM з додатковою підтримкою 8192 і 16384 QAM. Крім того, як і мережі довгострокового розвитку (LTE), в яких підтримується агрегація несучих (CA), останні специфікації DOCSIS підтримують зв'язування каналів. Удосконалення забезпечують підтримку мобільного транзитного/фронтального зв'язку (MBH/MFH), відео з надвисокою роздільною здатністю (4K/8K) та інших додатків віртуальної реальності та IoT. Отже, з еволюцією кабельних технологій, можливостями широкопasmового зв'язку, значною гнучкістю та здатністю підтримувати величезну кількість користувачів очікується, що мережі HFC постійно домінуватимуть на ринку широкопasmового доступу. Проте широкопasmові послуги кабельного телебачення залежать від спільної мережевої інфраструктури [18].

Таким чином, мережева залежність від кількості абонентів, які спільно використовують головне з'єднання, обмежує ефективну пропускну здатність, яку можна надати.

Не дивлячись на успіхи технологій кабельного телебачення, на можливості VDSL та безпроводних технологій, у даній роботі значна увага приділяється саме оптичним технологіям WDM-PON та XG-PON, які є беззаперечно перспективними.

Актуальність роботи полягає у постійному зростанні вимог щодо пропускну здатності мереж доступу для задоволення потреб користувачів у різноманітних і високошвидкісних послугах. Проблемою є забезпечення користувачів високоякісними широкопasmовими послугами.

Мета дисертації полягає у дослідженні технологій WDM-PON та XG-PON щодо пропускну здатності та інших параметрів. А також у оцінці особливостей та переваг цих технологій при побудові мереж доступу.

Об'єктом дослідження є пасивні оптичні мережі доступу. Предметом дослідження є побудова мереж доступу на основі технології WDM-PON.

Завданнями роботи є проаналізувати технології WDM-PON і XG-PON та визначити можливості збільшення пропускної здатності, оцінити параметри та особливості застосування цих технологій для побудови мереж доступу. Провести також порівняння цих двох технологій та визначити їх переваги при побудові мереж доступу, обґрунтувати вибір технології WDM-PON для побудови широкосмугових мереж доступу і модернізації існуючих і оцінити її переваги при застосуванні. Запропонувати варіанти застосування обладнання різних виробників для побудови мереж за цими технологіями.

1 ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ НА ОСНОВІ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

1.1 Оптиволоконні технології широкосмугових мереж доступу

Найбільш розвиваючим сегментом сфери телекомунікації є широкосмугові мережі доступу. Високошвидкісний або широкосмуговий доступ (ШСД) – доступ до мережі Інтернет з великою швидкістю, є протилежністю комутованому доступу з використанням модему і телефонної мережі загального користування. Якщо комутований доступ має обмеження по швидкості 56 кбіт/с та повністю займає телефонну лінію, то широкосмугові технології забезпечують в багато разів більшу швидкість обміну даними. Мережі доступу почали переходити на оптичні технології, що дало змогу збільшити швидкість та пропускну здатність мережі. Що стосується гібридних волоконно-коаксіальних технологій (HFC), то вони проявили себе в мережах кабельного телебачення. З цього можемо зробити висновок, що застосування оптиволоконних технологій на сьогоднішній час є перспективним вектором розвитку мереж широкосмугового доступу. Технології SDH, PON, WDM добре проявили себе і дали змогу досягнути швидкості передачі даних 1-40 Гбіт/с.

На сьогодні, серед технологій оптичних мереж доступу найбільш використовується Passive Optical Network (PON). Суть технології PON в тому, що між центральним і абонентськими вузлами створюється повністю пасивна оптична мережа деревовидної топології. В проміжних вузлах дерева розміщені компактні оптичні розгалужувачі (сплітери), які не потребують джерела живлення і обслуговування. Вся інформація передається від оптичного лінійного терміналу (Optical Line Terminal – OLT) до оптичних мережевих блоків у кінцевих користувачів (Optical Network Unit – ONU, або Optical Network Terminal – ONT) та читається з них (Рис.1.1). [1]

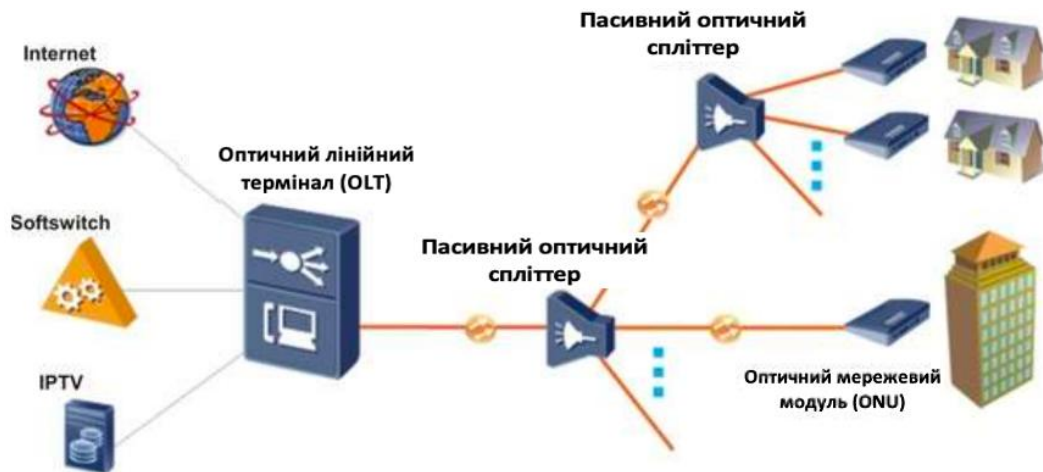


Рисунок 1.1 – Мережа PON

Кількість абонентських вузлів ONU, підключених до одного оптичного терміналу OLT, може бути дуже великою і обмежена тільки потужністю, та максимальною швидкістю приймально-передавальної апаратури. Для передачі інформації від OLT до ONU як правило, використовується довжина хвилі 1550 нм, а від ONU до OLT передача відбувається на довжині хвилі 1310 нм. В OLT та ONU встановлені мультиплексори WDM, які розділяють прямий та зворотній потік інформації, що дає можливість передачі багатьох сигналів на різних довжинах хвиль по одній жилі.

Застосування технології PON в мережах доступу має чимало переваг:

- економія волокон в абонентських оптичних кабелях;
- зменшення оптичних випромінювачів на головній станції;
- можливість одночасної передачі трьох видів інформації – голосу, відео і даних;
- немає необхідності живлення мережевих елементів (крім кінцевих);
- невеликі витрати на обслуговування обладнання;
- можливість підключення великої кількості абонентів;
- можливість динамічної зміни швидкості передачі інформації;
- подальше збільшення швидкості передачі (до 10Гбїт/с і вище) [2].

Різновиди PON

PON технологія поділяється на кілька різновидів, в залежності від протоколів передачі даних:

- APON (ATM PON) – стандарт ITU-T G.983.x;
- BPON (Broadband PON) – стандарт ITU-T G.983.x;
- EPON (Ethernet PON) – стандарт IEEE 802.3ah;
- GPON (Gigabit PON) – стандарт ITU-T G.984.x.
- WDM-PON (пасивна оптична мережа).

APON – технологія розроблена в середині 90-х років. Передача інформації базується на принципі АТМ, що забезпечує швидкість передачі 155 Мбіт/с, у разі симетричного режиму, та 622 Мбіт/с в прямому потоці і 155 Мбіт/с в зворотньому потоці в асиметричному режимі. Для коректної передачі інформації та уникнення змішування потоків OLT виконує запит у ONU на дозвіл відправки інформації. Такий різновид технології PON майже не використовується в наш час.

BPON – наступний крок вдосконалення технології. Швидкість передачі інформації збільшена до 622 Мбіт/с в симетричному режимі, та 1244 Мбіт/с в прямому потоці і 622 Мбіт/с в зворотньому потоці в асиметричному режимі. Виділено довжину хвилі 1550 нм для потоку відеоінформації.

EPON – технологія розроблена на початку 2000 року. Для передачі інформації використовувалася технологія Ethernet, що забезпечила швидкість передачі 1 Гбіт/с в прямому і зворотньому потоках, базуючись на IP-протоколі для 32 абонентів.

GPON – є наступним кроком розвитку технологій APON-BPON. Швидкість передачі інформації збільшена до 1244 Мбіт/с в симетричному режимі, та 2488 Мбіт/с в прямому потоці і 1244 Мбіт/с в зворотньому потоці в асиметричному режимі. Великим недоліком системи побудованої на базі цієї технології – велика вартість обладнання, що дає можливим використовувати її тільки великим операторам [3].

Розглянемо існуючі технології PON та проведемо аналіз їх характеристик (Табл.1.1) [1].

Таблиця 1.1 – Технології PON

Назва технології	APON(BPON)	EPON	GPON
Інститут стандартизації	ITU-T SG15/FSAN	IEEE/EFMA	ITU-T SG15/FSAN
Дата прийняття	1998 р.	2004 р.	20003 р.
Стандарт	ITU-T G.983.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Швидкість передачі даних, прямий/зворотній потік, Мбіт/с	155/155 622/155 622/622	1000/1000	1244/155,622,1244 2488/622,1244,2488 8
Базовий протокол	ATM	Ethernet	SDH
Лінійний код	NRZ	8B/10B	NRZ
Максимальний радіус мережі, км	20	20	20
Кількість абонентів на одне волокно	32	16	64
Корекція помилок FEC	Передбачена	Відсутня	Необхідна
Довжина хвиль прямого/зворотнього потоку, нм	1550-1310 (1480-1310)	1550-1310 (1310-1310)	1550-1310 (1480-1310)
Динамічний розподіл смуги	Передбачено	Підтримує	Передбачено
IP-фрагментація	Передбачена	Відсутня	Передбачена
Захист даних	Шифрування відкритими ключами	Відсутній	Шифрування відкритими ключами
Резервування	Передбачено	Відсутнє	Передбачено

Таким чином бачимо, що технологія GPON на даний момент є найбільш ємною (велика кількість абонентських вузлів), забезпечує більш швидкісне з'єднання, підтримує IP-фрагментацію та захист даних.

1.2 Волоконно оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ)

Структура та функціональні елементи оптичної мережі доступу.

Як було зазначено вище, волоконно-оптичні кабелі (ВОК) використовуються для передачі сигналів навколо (між) будинків і всередині об'єктів. При побудові зовнішніх комунікаційних магістралей перевагу надають оптичним кабелям, а всередині будівель (внутрішні підсистеми) нарівні з ними використовується традиційна вита пара. Таким чином, розрізняють ВОК для зовнішньої (outdoor cables) та внутрішньої (indoor cables) прокладки. До окремого виду належать з'єднувальні кабелі всередині приміщень вони використовуються як сполучні шнури та комунікації горизонтального розведення – для оснащення окремих робочих місць, а зовні – для об'єднання будівель. Монтаж волоконно-оптичного кабелю здійснюється за допомогою спеціальних інструментів та приладів [4].

Оптична мережа доступу складається з оптичного кабелю та інших волоконно-оптичних компонентів і простягається від вузла доступу до кінцевої точки в приміщеннях абонентів. Зазвичай вузол доступу розташований в апаратній кімнаті оператора зв'язку, а кінцевий пристрій абонента - у будинковому розподільнику.

При будівництві оптичних мереж доступу використовуються такі способи прокладки оптичного кабелю:

- Прокладка в існуючу кабельну каналізацію або в заново прокладені підземні труби
- Прокладка кабеля безпосередньо в землю (за допомогою кабелеукладача або в підготовлену траншею)
- Підвіска кабелю на опорах (повітряна прокладка)
- Підводна прокладка дном моря, озера або річки

Кабельна траса може включати прямі та/або розгалужувальні муфти. Прямі кабельні муфти необхідні, оскільки будівельні довжини кабелю обмежуються можливостями виробництва, та й з інших суто технічних міркувань часто

неможливо прокласти кабельну трасу, використовуючи один безперервний кабель. Ці муфти поміщаються в герметичний кожух і розташовуються в кабельних колодязях, люках, безпосередньо під землею або на опорах в залежності від обраного способу прокладання кабелю. Розгалужувальні кабельні муфти використовуються при необхідності виділити частину волокон з кабелю з великою кількістю волокон в один або кілька кабелів. Розгалужувальні муфти можуть поміщатися в герметичний кожух, проте використання кабельних шаф забезпечує більшу гнучкість і покращує ремонтпридатність у ситуаціях, коли кількість відгалужень велика і може збільшитися в майбутньому.

Кожна кабельна ділянка закінчується з обох кінців патч-панелями або віконними пристроями. Розподільник оператора зв'язку або будинковий розподільник великого підприємства може складатися з оптичних розподільників великої ємності. Домовий розподільник житлової багатоповерхової будівлі зазвичай є кінцевим пристроєм або патч-панелью. У будинку на одну сім'ю встановлюється невеликий будинковий або квартирний розподільник з оптичним кінцевим пристроєм або кінцевим пристроєм із вбудованим ONU. Оптична мережа доступу може включати проміжні розподільники, такі як міські, кампусні або сільські [5].

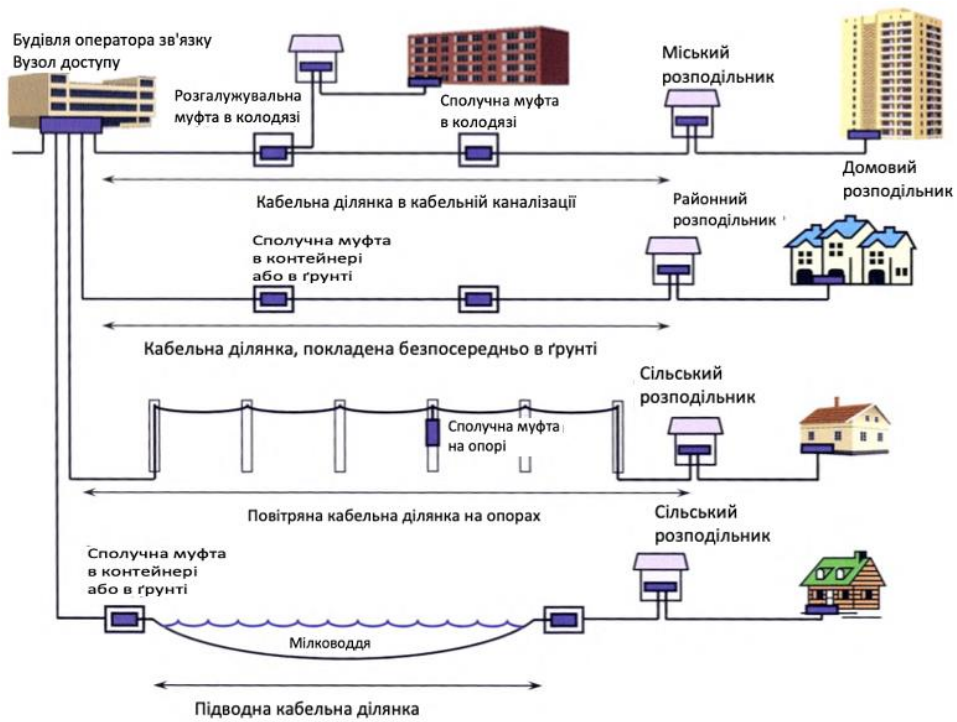


Рисунок 1.2 – Структура та функціональні елементи оптичної мережі доступу з різними методами прокладання кабелю

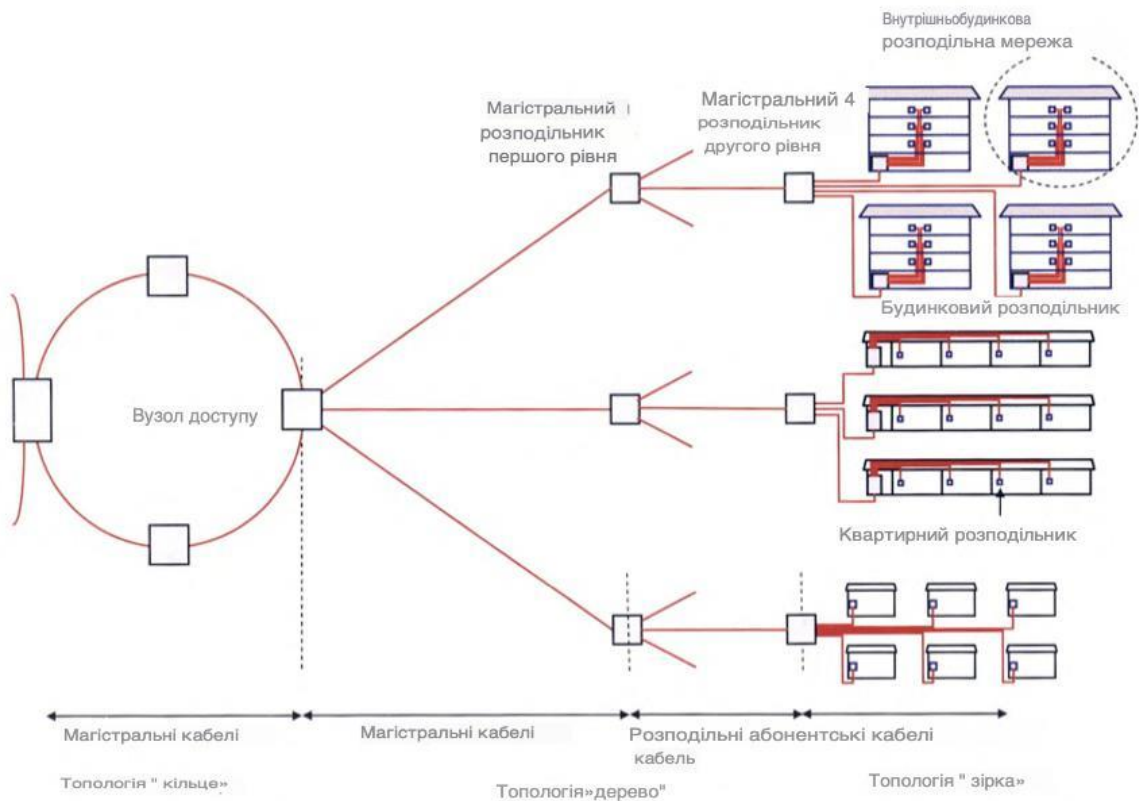


Рисунок 1.3 – Загальна структура мережі доступу

1.3 Еволюція волоконно-оптичних систем зв'язку

За останній час значно збільшився попит на трафік даних і його постачання через інформаційно-комунікаційні технології. Саме тому з'явилася необхідність розглянути останні 20 років, щоб проаналізувати еволюцію волоконно-оптичних систем зв'язку, оцінити перспективи побудови широкосмугових мереж доступу на основі волоконно-оптичних технологій та потенційні шляхи їх розвитку.

В липні 1997 року з точки зору значного комерційного впровадження, почалася ера систем з використанням спектрального ущільнення каналів (Wavelength Division Multiplexing – WDM). Такі системи мали 16 каналів зі швидкістю 2,5 Гбіт/с і спектральною ефективністю (SE) 0,0125 біт/с/Гц. Ключовий параметр продуктивності систем WDM, SE визначається як відношення сукупної пропускної здатності системи C_{Sys} до пропускної здатності системи B_{Sys} , що для однорідної системи WDM еквівалентно відношенню бітрейту на канал R_{Ch} до частотного інтервалу F_{Ch} між каналами WDM,

$$SE = \frac{C_{Sys}}{B_{Sys}} = \frac{R_{Ch}}{F_{Ch}}.$$

Також в 1997 році представлено однохвильову систему зі швидкістю 10 Гбіт/с. Були введені в експлуатацію трансатлантичні кабелі TAT12/13. Кожен кабель мав 2 пари волокон і передавав одну довжину хвилі зі швидкістю 5 Гбіт/с на кожне волокно протягом 5913 км, використовуючи леговані ербієм волоконні підсилювачі (EDFA) як повторювачі, для сумарної пропускної здатності кабелю 20 Гбіт/с; сумарна ємність кабелю на добуток відстані становила 118 Тб/с.км.

У дослідницьких експериментах була встановлена рекордна загальна пропускна здатність WDM – 1 Тбіт/с (55x20 Гбіт/с і 25x20 Гбіт/с), що більш ніж у 10 разів перевищує спектральну ефективність SE (Табл.1.2).

Таблиця 1.2 – Екстраполяція оптоволоконних систем

Рік	1997	2017	2037
Інститут стандартизації	ITU-T SG15/FSAN	IEEE/EFMA	ITU-T SG15/FSAN
Швидкість інтерфейсу R_{ch}	2.5 – 10 Гбіт/с	100 – 400 Гбіт/с	2 – 6 Тбіт/с
Довжина хвилі	16	96 – 192	16 – 66
Односторонній режим C_{sys}	40 Гбіт/с	10 – 76 Тбіт/с	32 – 400 Тбіт/с
Односторонній режим SE	0.0125 біт/с/Гц	2 – 8 біт/с/Гц	7 – 20 біт/с/Гц
Ємність маршрутизатора	24x2.5 Гбіт/с	120x400 Гбіт/с	5.120x6 Тбіт/с

Записи досліджень на сьогодні інформують про досягнення швидкості інтерфейсу понад 1 Тбіт/с, а сукупну пропускну здатність WDM в одномодовому волокні до 115 Тбіт/с. Використовуючи багатожилльне волокно, було досягнуто пропускну здатності системи до 10 Пбіт/с. Системи малого радіусу дії продемонстрували рекордну SE 17,3 біт/с/Гц на одномодовому волокні; Подальший розвиток припускає, що обчислювальні технології продовжують своє (функціональне) масштабування на ~40%, базуючись на історичних тенденціях розвитку. Далі більш детально обговоримо технологічне обґрунтування цих екстраполяцій (Рис.1.4).

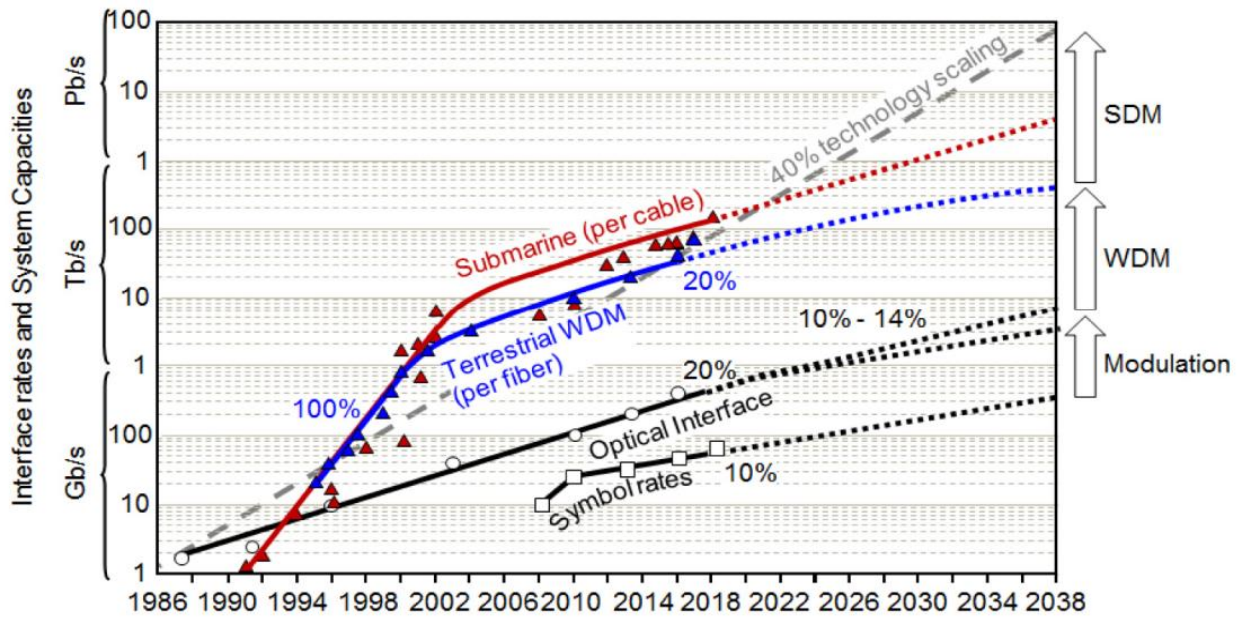


Рисунок 1.4 – Еволюція оптичних систем передачі даних та екстраполяція розвитку

Розвиток волоконно-оптичних систем можна розділити на чотири основні епохи:

- ера регенерації (1977-1995);
- ера посиленних дисперсно-керованих систем (1995-2008);
- ера посиленних когерентних систем (2008 рік-теперішній час);
- ера мультиплексування з просторовим розділенням (активно досліджується).

Ера регенерації

Пропускна здатність ранніх волоконно-оптичних систем передачі залежала від швидкості інтерфейсу трансиверів, тобто від швидкості передачі даних, яку трансивери могли підтримувати. Прогрес у швидкості інтерфейсу був надзвичайно повільним не лише в комерційних системах, але й у дослідницьких експериментах. На рис.1.5 показано приблизно 20% за рік (0,8 дБ/рік) покращення швидкості інтерфейсу, яке, як не дивно, зберігається більше трьох десятиліть. Результати досліджень зростали повільніше, приблизно 14% на рік. У 1989 році була представлена перша комерційна оптико-електронна регенована система WDM з двома довжинами хвилі (кожна довжина хвилі 1,7 Гбіт/с), але подальший

прогрес обмежився збільшенням швидкості передачі даних з 1,7 Гбіт/с до 2,5 Гбіт/с.

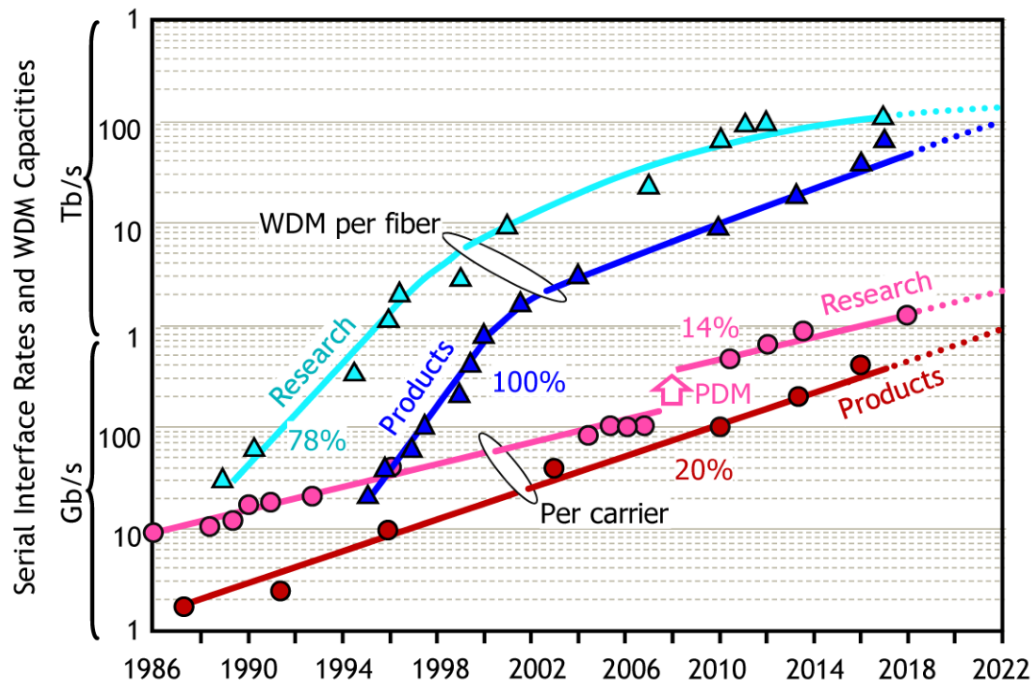


Рисунок 1.5 – Порівняння результатів і дослідницьких записів щодо швидкості інтерфейсу та ємності WDM

Перші оптичні підводні системи передачі, розгорнуті через Атлантичний океан (TAT8) і Тихий океан (TPC3) наприкінці 1980-х років, були регенерованими системами, що працювали на 1,3 мкм і передавали 280 Мбіт/с по кожній з трьох пар волокон. TAT9 і TPC4 були першими трансокеанськими системами, що працювали на 1,55 мкм з подвійною пропускною здатністю попередніх систем, але вони також були оптико-електронно регенеровані.

Ера посилених дисперсно-керованих систем

Економічно ефективні системи WDM явно були б неможливі без винаходу практичних оптичних підсилювачів, і, зокрема, EDFA як революційної технології, яка почала цю еру оптичної передачі. Але EDFA сам по собі не міг забезпечити вибухове експоненціальне зростання потужності як дослідницьких, так і комерційних систем, зображених на рис.1.4 і 1.5. Саме поєднання кількох ключових винаходів на початку 1990-х років, пов'язаних із керуванням нелінійністю оптоволоконна по всій смузі пропускання, що забезпечується EDFA,

дозволило феноменальне зростання на 100% за рік (3 дБ/рік) ємності WDM з середини 1990-х до початку 2000-х років. Результати досліджень зростали також повільніше, приблизно 78% на рік.

Ера посиленних когерентних систем

Когерентні ресивери були широко досліджені в 1980-х роках, оскільки їх висока чутливість дозволяла збільшити відстань між ресиверами в регеноерованих системах того часу, але через труднощі, пов'язаних з аналоговою синхронізацією частоти та фази, вони не були комерційно використані для мережевих волоконно-оптичних систем. Успіх EDFA на початку 1990-х зробив регеноеровані системи застарілими, що також призупинило роботу над когерентними ресиверами. Насправді відродження когерентних систем було викликано потребою розблокувати системи з вищим SE та з меншими проблемами, пов'язаними з хроматичною та поляризаційною дисперсією, які переслідували системи 40 Гбіт/с на початку 2000-х років, так і завдяки можливостям, оскільки швидкість обробки CMOS та інтегрованих у CMOS аналого-цифрових перетворювачів (ADCs) і цифро-аналогових перетворювачів (DACs) досягнуто швидкість 10 Гбод. Цифрові когерентні ресивери поєднують переваги аналогового гомодинного детектування (мінімальні вимоги до пропускної здатності ресивера) з простотою аналогового гетеродинного детектування (не потребують оптичної синхронізації фаз). Кілька дослідницьких груп вивчали цифрове когерентне детектування, починаючи з 2004 року, з метою створення транспондерів 40 Гбіт/с, що використовують квадратурну фазову маніпуляцію (QPSK) на ~10 Гбод.

Майбутні напрямки досліджень

Зростання мережевого трафіку було досліджено з різних точок зору, що підтверджує його триваючий експоненційний характер. Типові цифри для довгострокового зростання трафіку знаходяться в діапазоні 60%/рік (2 дБ/рік) (рис.1.6).

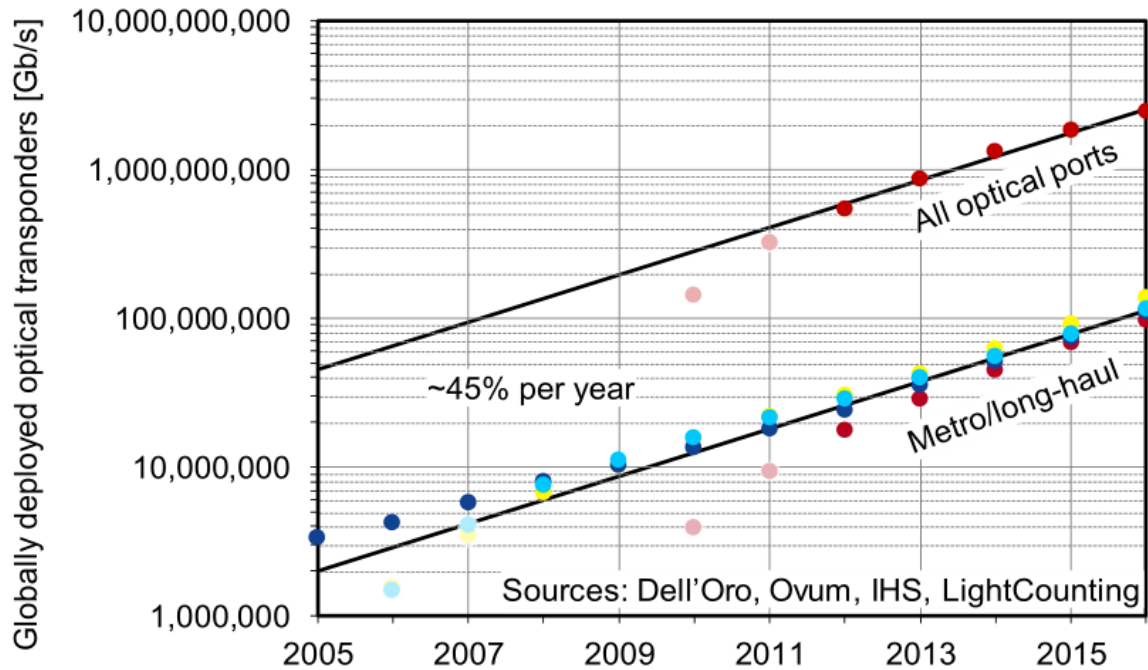


Рисунок 1.6 – Графік зростання глобального мережевого трафіку

На рисунку показано річне збільшення загальної потужності розгорнутого оптичного ретранслятора на $\sim 45\%$ за останнє десятиліття на всіх оптичних портах, включаючи клієнтські інтерфейси та доступні інтерфейси короткої дії. Постійне експоненціальне зростання глобального трафіку на $\sim 45\%$ на відміну від швидкості інтерфейсу та ємності оптоволокна, що масштабується лише на $\sim 20\%$ на рік, демонструє дедалі більш критичну невідповідність, що призводить до «кризи ємності», яка очікується приблизно через десять років [6].

1.4 Перспективність ВОЛЗ

Найвищою пропускною здатністю серед усіх існуючих засобів зв'язку має оптичне волокно (діелектричні хвилеводи). Волоконно-оптичні кабелі застосовуються для створення волоконно-оптичних ліній зв'язку, здатних забезпечити найвищу швидкість передачі (залежно від типу використовуваного активного устаткування швидкість передачі може становити десятки гігабайт і навіть терабайт на секунду). Кварцове скло, що є несучим середовищем ВОЛЗ, крім унікальних пропускних характеристик, має ще одну цінну властивість – малі

втрати та нечутливість до електромагнітних полів. Це вигідно відрізняє його від звичайних мідних кабельних систем. Ця система передачі інформації, як правило, використовується при будівництві робочих об'єктів як зовнішні магістралі, що поєднують розрізнені споруди або корпуси, а також багатоповерхові будівлі. Вона може використовуватися і як внутрішній носій структурованої кабельної системи (СКС), проте закінчені СКС повністю з волокна зустрічаються рідше – через високу вартість будівництва оптичних ліній зв'язку. Застосування ВОЛЗ дозволяє локально поєднати робочі місця, забезпечити високу швидкість завантаження Інтернету одночасно на всіх машинах, якісний телефонний зв'язок та телевізійний прийом [4].

Базова конструкція оптоволоконного кабелю

Оптичні волокна — це круглі діелектричні хвилеводи, які можуть транспортувати оптичну енергію та інформацію. Вони мають центральне ядро, оточене концентричною оболонкою з трохи нижчим (на $\approx 1\%$) показником заломлення. Оптичні волокна, як правило, виготовляються з кремнезему з модифікуючими показники легуваннями, такими як GeO_2 . Захисне покриття з одного або двох шарів амортизаційного матеріалу (наприклад, акрилату) використовується для зменшення перехресного зчеплення між сусідніми волокнами та збільшення втрат мікровигинів, які виникають, коли волокна притискаються до шорстких поверхонь [7].

Волоконно-оптичний кабель складається з п'яти основних компонентів: серцевини, оболонки, покриття, зміцнювальних волокон і оболонки кабелю (рис 1.7).

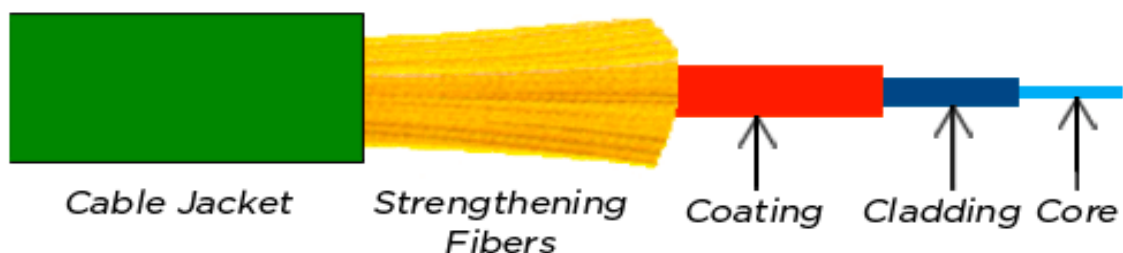


Рисунок 1.7 – Конструкція волоконно оптичного кабелю

Ядро: це фізичне середовище, яке транспортує оптичні сигнали від підключеного джерела світла до приймального пристрою. Серцевина — це одна безперервна нитка зі скла або пластику високої чистоти, діаметр якої вимірюється в мікронах (менше діаметра людської волосини). Чим більше серцевина, тим більше світла може передавати кабель, що відповідає вищій швидкості передачі даних.

Обшивка: це тонкий шар, який екструдується поверх серцевини і служить межею, яка містить світлові хвилі (докладніше про це пізніше), що дозволяє передавати дані по довжині волокна.

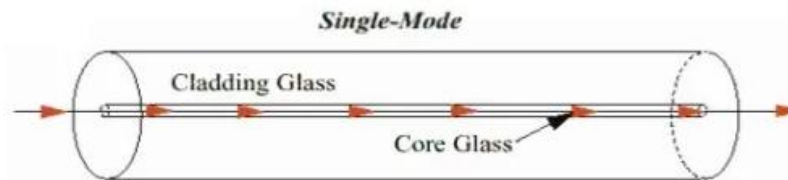
Покриття: це пластикове покриття оболонки для зміцнення серцевини волокна, поглинання ударів і забезпечення додаткового захисту від надмірних вигинів кабелю. Однак це не впливає на властивості оптичного хвилеводу.

Зміцнюючі волокна: ці компоненти допомагають захистити серцевину від здавлюючих сил і надмірного натягу під час встановлення. Матеріали можуть варіюватися від Kevlar® до дротяних ниток і рукавів, наповнених гелем. Іноді між волокнами додають світлопоглинаюче («темне») скло, щоб запобігти проникненню світла, яке витікає з одного волокна в інше. Це зменшує перехресні перешкоди між волокнами.

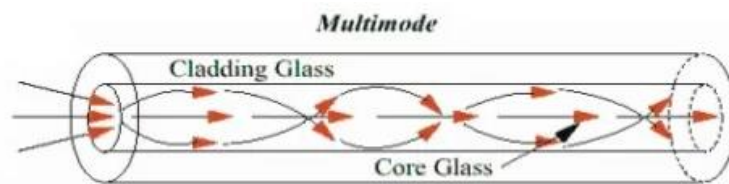
Оболочка кабелю: це зовнішній шар або оболонка кабелю. Його призначення – захистити кабель від шкідливих факторів навколишнього середовища, таких як будівельні роботи, знаряддя лову та навіть акули, яких часто приваблюють електричні поля, створювані провідниками сигналу до повторювачі [8].

Багатомодові та одномодові волокна

Одномодовий оптичний кабель - це одна підставка зі скловолокна діаметром від 8,3 до 10 мікрон, яка має один режим передачі. Одномодове оптоволокно забезпечує вищу швидкість передачі та до 50 разів більшу відстань, ніж багатомодове, але воно коштує дорожче. Одномодове волокно має набагато меншу серцевину, ніж багатомодове, оскільки йому потрібно передавати один сигнал одночасно.



А багатомодовий оптичний кабель складається з кількох скляних волокон із загальним діаметром у діапазоні від 50 до 100 мікрон. Багатомодове волокно забезпечує високу пропускну здатність на високих швидкостях на середніх відстанях. Однак у довгих кабелях (понад 3000 футів) кілька шляхів світла можуть спричинити спотворення сигналу на приймальному кінці , що призведе до нечіткої та неповної передачі даних . Тому для далеких дистанцій цей режим не надто корисний [9].



Основна відмінність між багатомодовим і одномодовим оптичним волокном полягає в тому, що багатомодове має більший діаметр серцевини, як правило, 50–100 мікрометрів; який набагато більший за довжину хвилі світла, що переноситься в ньому. Більший сердечник дозволяє одночасно передавати кілька світлових променів або режимів (модальностей), кожен під дещо іншим кутом відбиття всередині оптичного волокна. З практичної точки зору, більший розмір сердечника спрощує підключення, а також дозволяє використовувати дешевшу електроніку, таку як світлодіоди (LED) і поверхнево-випромінювальні лазери з вертикальним резонатором (VCSEL).

Однак передача по багатомодовому оптоволокну використовується для відносно коротких відстаней, оскільки моди мають тенденцію до розсіювання/спотворення на більшій довжині, що призводить до нечіткої та неповної передачі даних (рис 1.8). Для великих відстаней використовується

одномодове волокно (іноді його називають мономодовим), оскільки воно не обмежене модальною дисперсією.

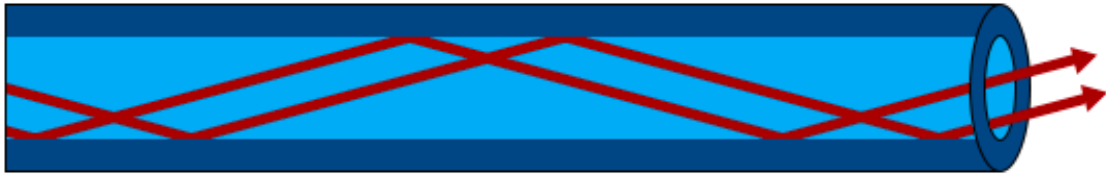


Рисунок 1.8 – Передача багатомодового волокна

Завдяки високій пропускній здатності та надійності багатомодове оптичне волокно здебільшого використовується для зв'язку на коротких відстанях, наприклад, у межах будівлі чи на території університету. Типові обмеження швидкості передачі та відстані становлять 100 Мбіт/с для відстаней до 2 км, 1 Гбіт/с до 1000 м і 10 Гбіт/с до 500 м. Пропускню здатність можна додатково збільшити за допомогою мультиплексування з розподілом по довжині хвилі (WDM), технології, яка мультиплексує («мультиплексує») кілька сигналів оптичної несучої на одному оптичному волокні за допомогою різних довжин хвиль (тобто кольорів) лазерного світла. Ця техніка забезпечує двонаправлений зв'язок по одній нитці волокна, а також збільшує пропускню здатність.

Система WDM використовує мультиплексор на передавачі, щоб об'єднати сигнали разом, і демультиплексор на приймачі, щоб розділити їх. З правильним типом волокна можна мати пристрій, який виконує обидві функції одночасно. Сучасні системи WDM можуть обробляти до 160 сигналів або більше та можуть розширювати систему зі швидкістю 10 Гбіт/с через одну пару волокон до понад 1,6 Тбіт/с [8].

Принцип передачі оптичних сигналів волокном

Загальна схема передачі оптичних сигналів (випромінювання) по волокну показано на рис. 1.9. Передавач перетворює електричний сигнал на оптичний і вводить його в волокно. Приймач приймає оптичний сигнал і перетворює його на електричний для подальшої обробки. У міру поширення у волокні оптичний сигнал втрачає частину потужності, тобто згасає. Присутні у волоконно-оптичній

лінії зв'язку (ВОЛЗ) неоднорідності, зокрема зростки волокон, також викликають додаткові втрати потужності. На передавальній та приймальній сторонах оптичної лінії зв'язку волокна закінчуються конекторами для підключення до розподільчих панелей, які з'єднуються з передавачами та приймачами патч-кордами. Ці сполуки також завдають втрати. Крім того, неоднорідності в лінії, включаючи роз'ємні та нероз'ємні з'єднання, викликають часткове відображення оптичного сигналу, що поширюється у зворотному напрямку.

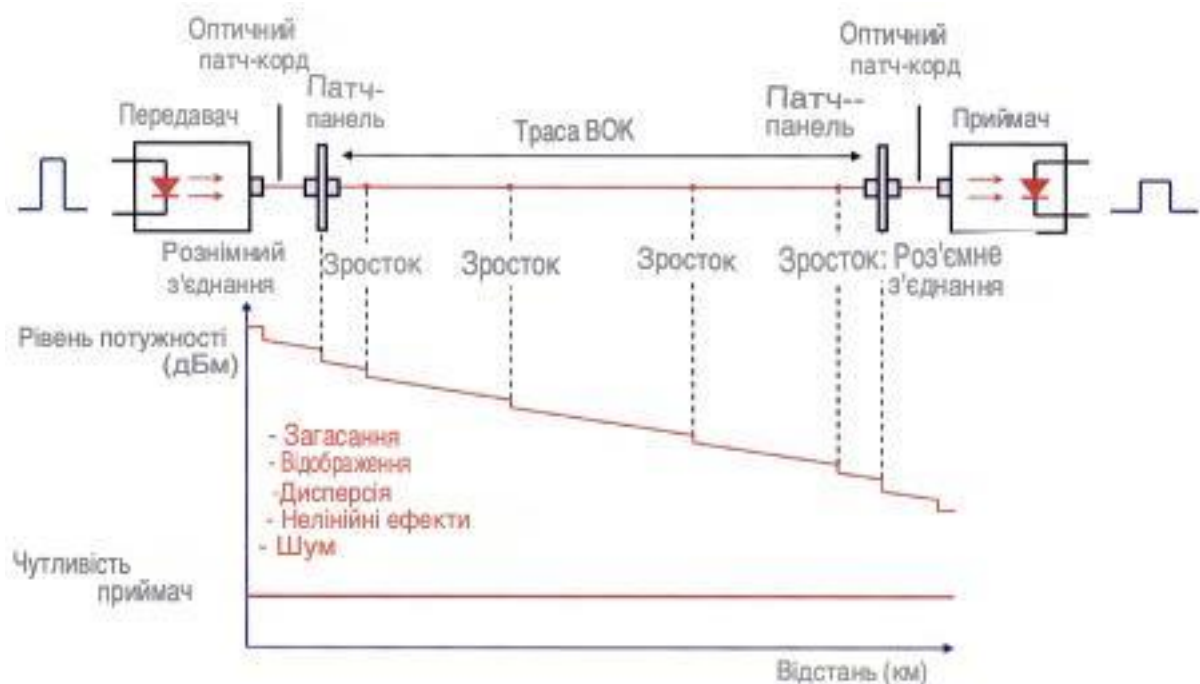


Рисунок 1.9 – Схема передачі оптичних сигналів по волокну

Загальне (внесене) згасання ВОЛЗ складається з загасання в самому волокні та додаткових втрат, що викликаються неоднорідностями, у тому числі нероз'ємними та роз'ємними сполуками. Рівень потужності оптичного сигналу на вході приймача менший за рівень на виході передавача на величину гасимого загасання ВОЛЗ. Рівень потужності ослабленого сигналу може бути достатнім для детектування його приймачем. Таким чином, при визначенні енергетичного бюджету ВОЛЗ необхідно враховувати вихідний рівень потужності передавача, загасання ВОЛЗ, що вноситься, і чутливість приймача. Важливим параметром ВОЛЗ є її широкосмуговість. Вона визначає найбільшу частоту переданого

сигналу, а, отже, і граничну швидкість передачі в цифрових системах зв'язку. Поняття широкопasmового зв'язку зазвичай використовується для багатомодових волокон. Для одномодових волокон найчастіше використовують дисперсію. Крім того, широкопasmова ність ВОЛЗ залежить також від характеристик передавача та приймача [5].

Характеристики та переваги оптичної передачі

Методи передачі сигналів по волоконно-оптичних кабелях мають значні переваги в порівнянні з передачею сигналів по електричних кабелях. Це зумовило швидкий розвиток волоконно-оптичного зв'язку. Оптичні кабелі мають також деякі недоліки, але їх переваги більш істотні.

Пропускна здатність оптичного волокна є надзвичайно високою. Гранична швидкість передачі і найбільша відстань, що перекривається, залежать від згасання і широкопasmової лінії, а також від характеристик передавача і приймача. Використання одномодових волокон дозволяє побудувати лінію зв'язку довжиною понад 100 км зі швидкістю передачі кілька Гбіт/с без встановлення ретрансляторів.

Мале згасання і висока широкопasmова є основними перевагами оптичних систем у порівнянні з електричними. Для порівняння коефіцієнт загасання одномодового волокна приблизно в 1000 разів менше, а широкопasmова в 4000 разів більше ніж у кручений пари кат. 6 (рис. 1.10-1.11). Невеликий коефіцієнт за тухання волокна дозволяє створювати протяжні магістральні мережі, а висока широкопasmова передавати інформацію з високою швидкістю [5].

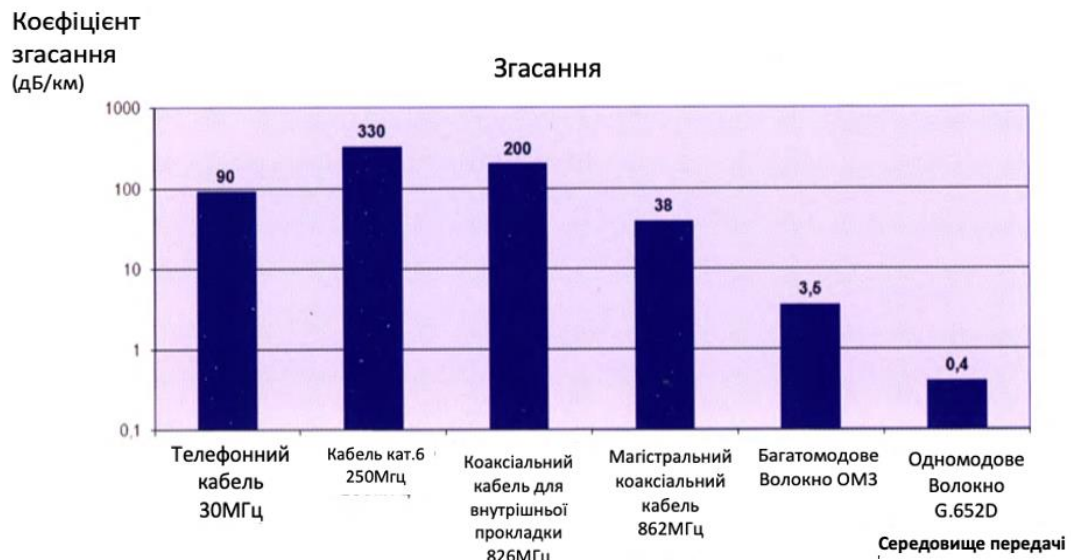


Рисунок 1.10 – Згасання одномодового волокна приблизно в 1000 разів нижче, ніж кабелю з мідними жилами

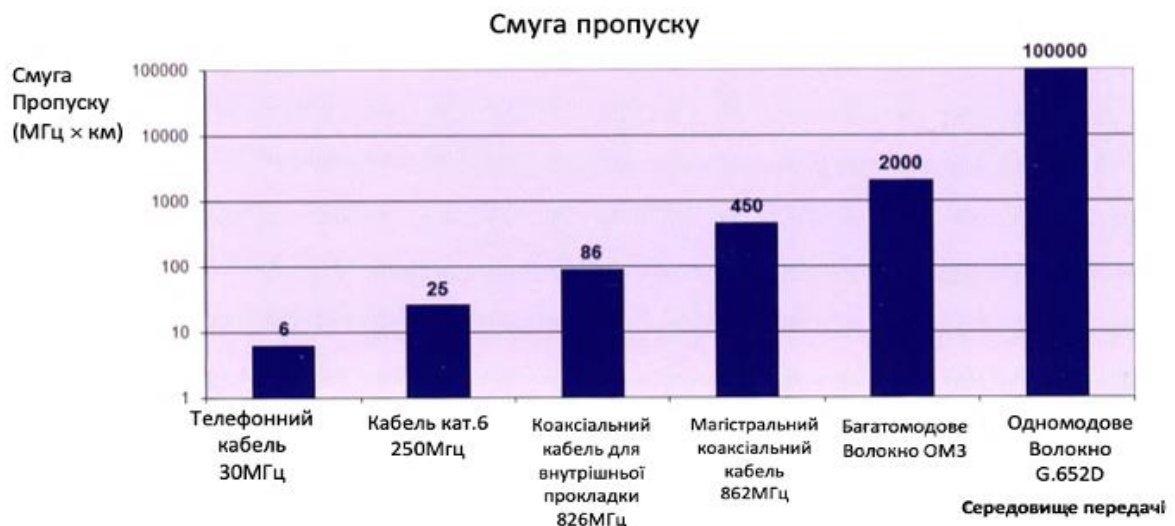


Рисунок 1.11 – Ширина смуги пропускання одномодового волокна (на одній довжині хвилі) приблизно в 4000 разів більша, ніж у кабелю з мідними жилами

Найпоширеніший матеріал для виготовлення волокна – плавлений кварц, який за своїми електричними властивостями є діелектриком. Таким чином, оптичні волокна не схильні до електромагнітних впливів, тобто вони нечутливі до перешкод і самі їх не створюють. Оптичні кабелі без металевих елементів не вимагають заземлення. Вони також стійкі до перепадів напруги електромережі або перенапруг, спричинених грозою. Однак, слід пам'ятати, що конструкція оптичних кабелів іноді містить металеві елементи, які можуть вимагати

заземлення та відповідного захисту. Оптичний кабель може використовуватися в тих випадках, коли застосування мідного кабелю неможливе або пов'язане з великими труднощами, наприклад, організація зв'язку в електро- та вибухонебезпечних зонах, вздовж ліній електропередач (ЛЕП), у тому числі при розміщенні волокон усередині грозозахисного троса.

Малі розміри та маса волокон дозволяють виготовляти кабелі з невеликими масою та габаритами. Це настільки спрощує транспортування та прокладання оптичного кабелю, що його будівельна довжина може становити до 12 км. Завдяки своїм малим розмірам кабелі не займають багато місця в кабельному каналі або трубопроводі. Виробництво оптичного кабелю коштує дешевше в порівнянні з виробництвом електричного кабелю завдяки економії витратних матеріалів та електроенергії [5].

1.5 Характеристики та переваги оптичних волокон

До основних оптичних характеристик волокон відносяться:

- Коефіцієнт згасання (багатомодові та одномодові волокна)
- Широкополосність (багатомодові волокна) або дисперсійні характеристики (одномодові волокна)
- Нелінійні явища (одномодові волокна)
- Довжина хвилі відсічення (одномодові волокна)
- Числова апертура (багатомодові волокна)

Під загасанням сигналу розуміють зменшення його оптичної потужності при поширенні по оптичному волокну. На згасання світла в волокні в основному впливають такі фактори як втрати на поглинання та втрати на розсіювання. Поглинання в оптичному волокні може бути власним та домішковим. Власне поглинання обумовлено поглинанням випромінювання інфрачервоної (ІЧ) та ультрафіолетової (УФ) областей спектра в кварці, а при місне - поглинанням випромінювання у домішках у волокні.

Таблиця 1.3 – Типові оптичні характеристики багатомодових волокон. Значення коефіцієнтів загасання та широкосмугового зв'язку наведені відповідно до стандартів EN 50173-1 та ISO/IEC 11801

Тип волокна → Параметри ↓	OM1 62,5/125 мкм	OM2 50/125 мкм	OM3 50/125 мкм	OM4 50/125 мкм
Коефіцієнт затування, ДБ/км 850 нм 1300 нм	≤ 3,5 ≤ 1,5	≤ 3,5 ≤ 1,5	≤ 3,5 ≤ 1,5	≤ 3,5 ≤ 1,5
Широкосмуговість, МГц × км 850 нм (СІД) 850 нм (Лазер) 1300 нм (СІД)	≥ 200 Не визначена ≥ 500	≥ 500 Не визначена ≥ 500	≥ 1500 ≥ 2000 ≥ 500	≥ 3500 ≥ 4700 ≥ 500
Числова апертура	0,275	0,200	0,200	0,200

Таблиця 1.4 – Типові оптичні характеристики одномодових волокон

Тип волокна → Параметри ↓	Одномодове волокно (SM) ITU-T G.652.A	Одномодове волокно з низьким водяним піком (LWP) ITU-T G.652.D	Нечутливе до вигинів одномодове волокно ITU-T G.657	
Коефіцієнт загасання, дБ/км 1310 нм 1310...1625 нм 1550 нм	≤ 0,45 Не визначено ≤ 0,40	≤ 0,40 ≤ 0,40 ≤ 0,30	A.1 і A.2 ≤ 0,40 ≤ 0,40 ≤ 0,30	B.2 і B.3 ≤ 0,50 Не визначено ≤ 0,30
Коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм×км) 1285...1330 нм 1530...1565 нм	≤ 3,5 ≤ 17	≤ 3,5 ≤ 17	A.1 і A.2 ≤ 3,5 ≤ 17	B.2 і B.3 Не визначено Не визначено
ПМД (поляр. мод.дисперсія)	≤ 0,5 пс/√км	≤ 0,2 пс/√км	≤ 0,2 пс/√км	Не визначено
Довжина хвилі відсічки, нм	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260	

Серед домішок, що викликають найбільше згасання, виділяють іони ВІН (гідроксильні групи). Через малі (мікроскопічні) зміни щільності і, отже, зміни показника заломлення матеріалу волокна світло, що розповсюджується в певному напрямку, може розподілятися (розсіюватися) у різних напрямках, у тому числі й у зворотному. Це призводить до появи розсіяного випромінювання і, отже, до втрат. Навіть за відсутності загасання за рахунок поглинання в волокні завжди буде присутнє загасання, обумовлене релієвським розсіюванням, яке становить приблизно 0,16 дБ/км на довжині хвилі 1550 нм. Залежність згасання від довжини хвилі для плавленого кварцу наведено на рис. 1.12.

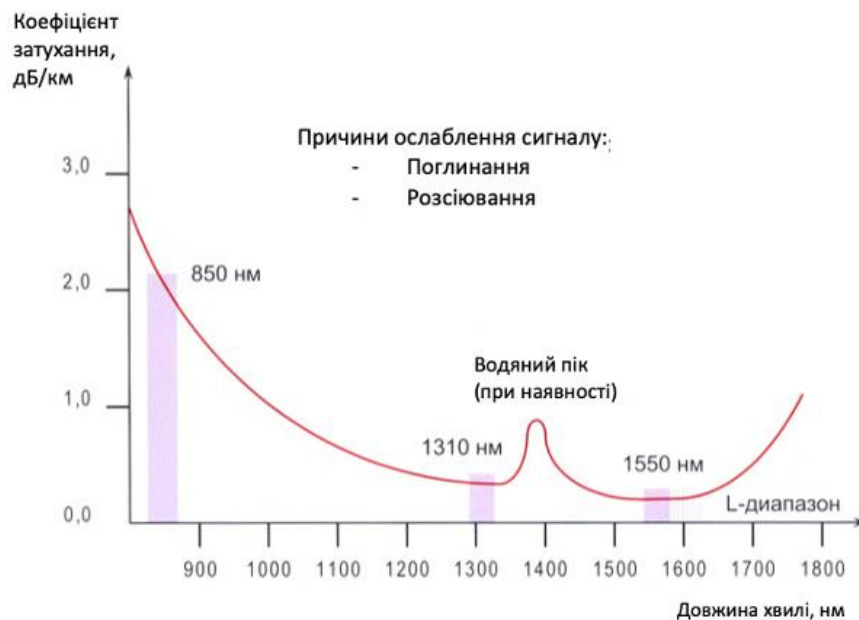


Рисунок 1.12 – Згасання кварцового волокна і вікна прозорості, що використовуються

Як видно із рис. 1.12, величина згасання мінімальна в діапазоні довжин хвиль 800...1700 нм. Поглинання в УФ області на більш коротких довжинах хвиль і в ІЧ області на більш довгих різко збільшують згасання. У системах зв'язку використовуються три діапазони довжин хвиль або так звані вікна прозорості: вікно прозорості 850 нм; вікно прозорості 1300/1310 нм та вікно прозорості 1550 нм [5].

Пік згасання, зумовлений наявністю гідроксильних груп, знаходиться між вікнами 1310 нм та 1550 нм і називається водяним піком. У одномодового волокна з низьким водяним піком (LWP) загасання на піку так мало, що це волокно може використовуватися навіть на довжинах хвиль, що відповідають водяному піку. Відповідно до рекомендацій ITU-T G.652.D значення загасання на довжині хвилі 1383 нм таке ж або навіть нижче, ніж нормоване значення для довжини хвилі 1310 нм.

Крива згасання для одномодового волокна з низьким водяним піком представлена на рис. 1.13 там же зображені O, E, S, C і L - діапазони.

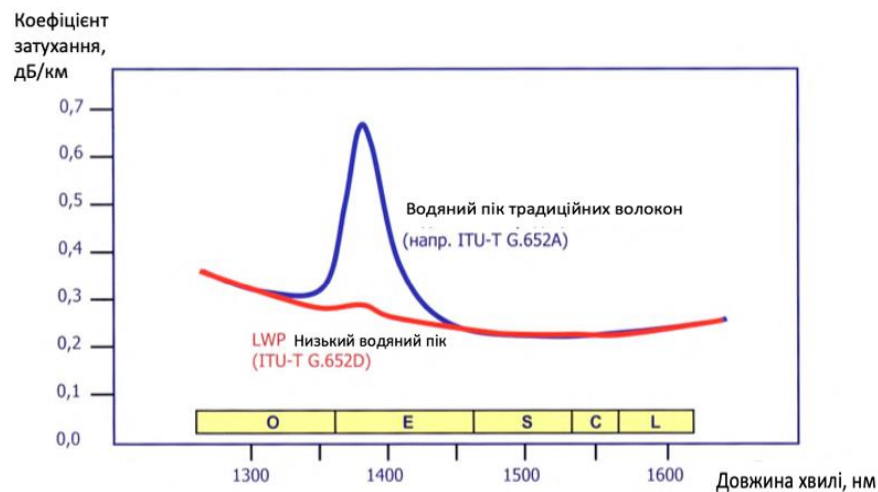


Рисунок 1.13 – Залежність коефіцієнта загасання одномодового волокна з низьким водяним піком (ITU-T G.652.D) від довжини хвилі

Додаткове згасання може бути викликане макровигинами (радіус вигину $\gg 1$ мм) та мікровигинами (радіус вигину < 1 мм), а також радіоактивним випромінюванням. Ці фактори, що призводять до додаткового ослаблення сигналу, повинні бути мінімізовані або повністю виключені в процесі конструювання кабелю і при його прокладці і монтажі.

Хроматична дисперсія в одномодовому волокні є найбільш суттєвим видом дисперсії. Вона визначається як сума матеріальної та хвилі водної дисперсії. Причиною появи хроматичної дисперсії є те, що близькі довжини хвиль, що становлять оптичний сигнал, мають різні швидкості поширення у волокні.

Одиницею виміру хроматичної дисперсії є $\text{пс}/(\text{нм}\cdot\text{км})$. Величина хроматичної дисперсії може бути як позитивною, і негативною. Якщо дисперсія негативна, це означає, що довгохвильові компоненти рухаються з більшою швидкістю, ніж короткохвильові, а якщо позитивна, то навпаки. Явище хроматичної дисперсії проявляється тим слабше, ніж ширина спектра переданого оптичного сигналу. Мінімальне значення хроматичної дисперсії для стандартного одномодового волокна (ITU-T G. 652) припадає на довжину хвилі, рівну приблизно 1310 нм. Шляхом зміни профілю показника заломлення, точка мінімуму була зміщена у бік вікна 1550 нм, де знаходиться також мінімум загасання для волокна з плавненого кварцу. Представниками цього покоління волокон є одномодові волокна з ненульовою зміщеною дисперсією, описані в рекомендації ITU-T G.655. Хроматична дисперсія – це властивість матеріалу волокна. Її величина не змінюється при виготовленні та прокладці кабелю. Типові значення хроматичної дисперсії одномодових волокон різних типів наведені в табл. 2.3. Хроматична дисперсія призводить до розширення світлових імпульсів (рис. 1.14), а також додаткового загасання оптичних імпульсів.

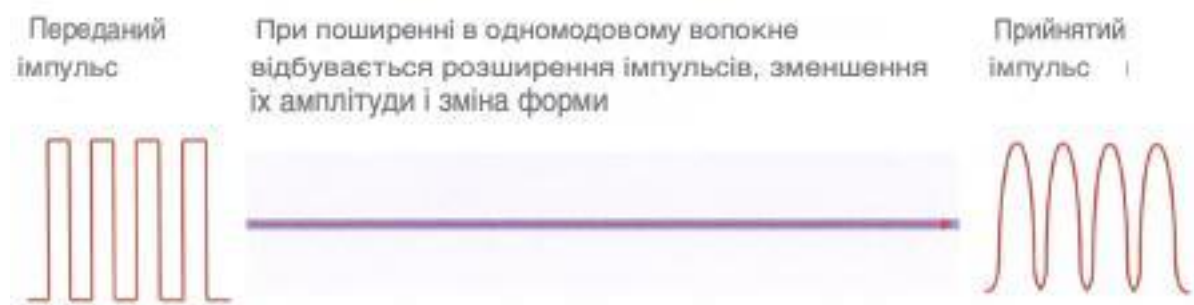


Рисунок 1.14 – Поширення оптичних імпульсів за рахунок хроматичної дисперсії

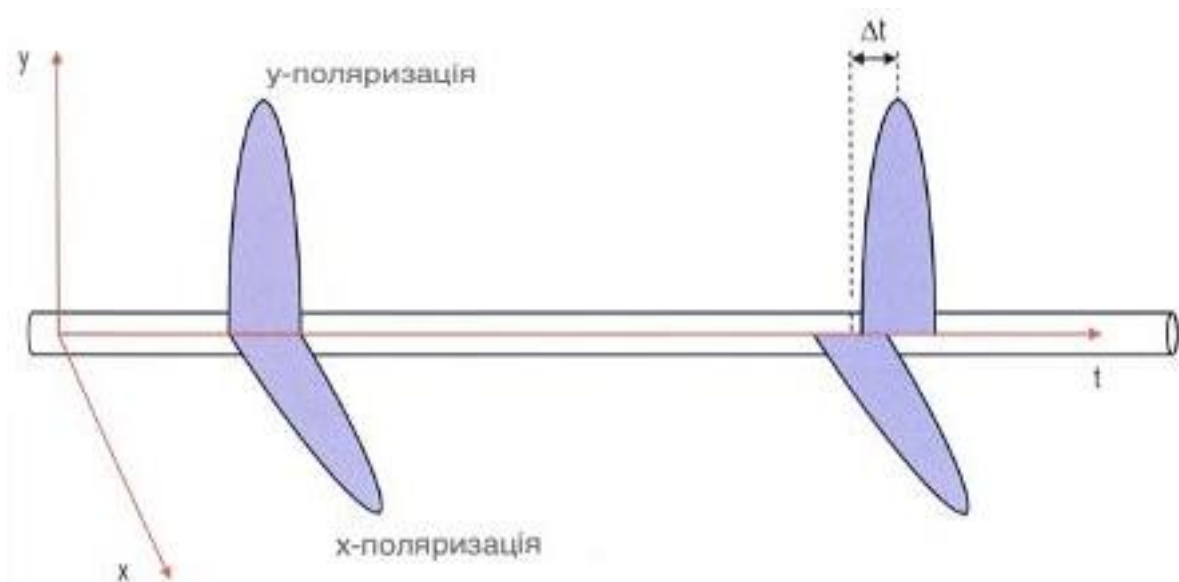


Рисунок 1.15 – Невелика відмінність швидкостей поширення двох поляризаційних мод (x і y) у волокні призводить до появи тимчасового зсуву між ними, тобто до дисперсії

Радіус вигину: у процесі прокладання та при подальшому використанні оптичний кабель може піддаватися вигинам. Часто при прокладанні кабель може піддатися одночасно вигину і розтягуванню. У процесі експлуатації кабелів, прокладених у трубопроводах або безпосередньо в ґрунті, згинальні напружки носять в основному статичний характер. Однак для підвісних кабелів вигини та одночасні розтягувальні напружки можуть виникнути раптово під впливом вітру.

Стандарт ІЕС 60794-1-2 визначає кілька різних методик дослідження стійкості кабелю до вигинів, кожна з яких призначена для конкретної мети дослідження. Величина мінімально допустимого радіусу вигину зазвичай вказується для двох випадків:

- Радіус вигину в процесі протяжки (коли кабель одночасно піддається і розтягуванню та вигину)
- Радіус вигину після прокладки без розтягуючої сили

Величина мінімального радіусу вигину для змонтованого кабелю менше, ніж при його прокладці. Ці значення залежать від виду кабельної конструкції та вказуються виробником для кожного типу кабелю. Типові мінімальні значення радіусу вигину для волоконно-оптичних кабелів:

- при протяжці кабелю: $20 \dots 30 \times D$
- при остаточному закріпленні: $15 \times D$, де D – діаметр кабелю.

Мінімальний радіус вигину оптичного волокна становить $30 \dots 40$ мм [5].

Параметри одномодового ОВ G.652, G.653, G.655

G.652 – одномодове волокно G.652 було визначено в рекомендації ІТУ G.652 (Характеристики одномодового оптичного волокна та кабелю). Це основний і найстаріший стандарт одномодового волокна. У цьому стандарті існує чотири підтипи волокна: А, В, С і D, з яких А є найстарішим, а D найновішим (сучасним). Версії А і В не визначають висоту піку води 1383 нм, на відміну від версій С і D (зі зменшеним і контрольованим піком води). Версії В і D мають кращі значення параметра PMD (індекс поляризаційної модової дисперсії).

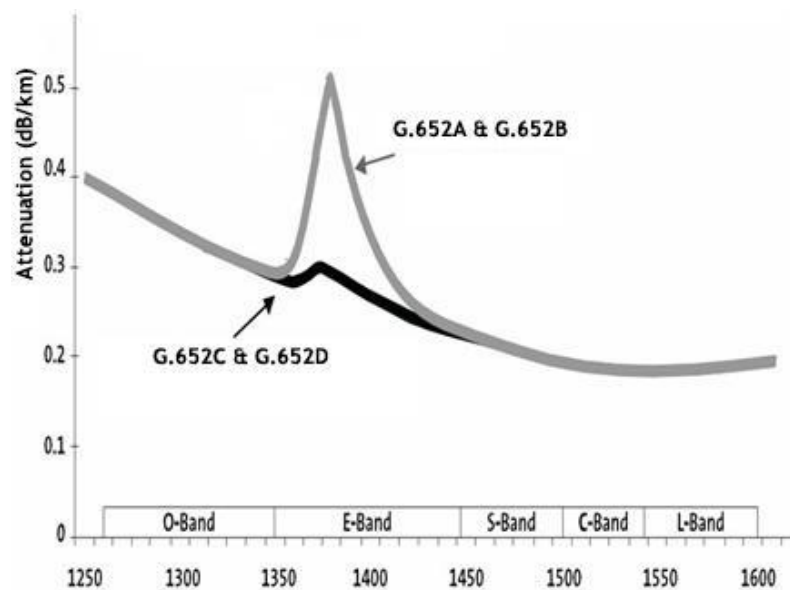


Рисунок 1.16 – Крива загасання оптичного волокна

Найважливіші параметри волокна G.652:

- Нульова хроматична дисперсія близько 1300-1324 нм,
- Макс. загасання 0,4 дБ/км при 1310 нм, 0,3 дБ/км при 1550 нм (трохи більше у версіях А і В),
- Хроматична дисперсія 17 пс/км/нм при 1550 (у стандарті визначається через нахил дисперсії),

- Хв. радіус вигину 30 мм,
- Макс. гранична довжина хвилі 1260 нм,
- Діаметр модового поля 8,5-9,5 мкм.

G.653 – одномодове волокно G.653 (DSF) було визначено в рекомендації ITU G.653 (Характеристики одномодового оптичного волокна та кабелю зі зміщеною дисперсією). В даний час волокно рідко зустрічається, і більше не виробляється, тому що воно не виявилось універсальним - воно було корисним тільки для одноканальної передачі в С-діапазоні. Його не можна було використовувати в багатоканальній передачі DWDM через дуже великі нелінійності, які були спричинені дуже низькими значеннями хроматичної дисперсії в С-діапазоні (номінально 1550 нм мала нульову дисперсію). Визначено дві версії стандарту G.653: А і В. Версія В має кращі значення параметра PMD. Найважливіші параметри волокна G.653:

- Макс. затухання 0,35 дБ/км при 1550 нм (тип. 0,275 дБ/км, не визначено для 1310 нм),
- Хв. радіус вигину 30 мм,
- Макс. гранична довжина хвилі 1270 нм,
- Діаметр модового поля 7,8-8,5 мкм.

G.655 – одномодове волокно G.655 (NZ DSF) було визначено в рекомендації ITU G.655 (Характеристики одномодового оптичного волокна та кабелю зі зсувом ненульової дисперсії). Це волокно зі зміщеною характеристикою хроматичної дисперсії с (мала, але ненульова дисперсія близько 1550 нм). Введення невеликої кількості хроматичної дисперсії в третьому вікні передачі було прийнято через дуже високу нелінійність, що спостерігається у волокні G.653 з нульовою хроматичною дисперсією. Оптичне волокно G.655 зустрічається на практиці досить часто, хоча воно має обмежене застосування. Обмежена універсальність є результатом того факту, що оскільки волокно оптимізоване для передачі DWDM, воно може бути проблематичним при використанні для CWDM-передача через високу граничну довжину хвилі. Волокно G.655 може мати позитивну або негативну хроматичну

дисперсію. Сегменти волокна з негативною дисперсією можуть використовуватися в мережах метро для передачі та компенсації одночасно. Оскільки волокно має низькі значення хроматичної дисперсії, можливі довші з'єднання, ніж у випадку волокна G.652, без необхідності компенсації хроматичної дисперсії в з'єднаннях із високими бітрейтами. Було визначено п'ять версій стандарту - A, B, C, D і E. Вони відрізняються (суттєво) профілем хроматичної дисперсії. Найважливіші параметри волокна G.655:

- Макс. загасання 0,35 дБ/км при 1550 нм,
- Дисперсія 4-10 пс/нм/км при 1550нм,
- Макс. довжина хвилі зрізу 1450 нм,
- Діаметр режимного поля 8-11 мм (на практиці може бути менше стандартних вимог) [11].

Параметри одномодового ОВ G.656, G.657

G.656 - Волокно з ненульовою дисперсією для систем CWDM і DWDM. Оптичне волокно ITU-T G.656 призначене для використання в широкосмугових системах призначене для роботи у вікнах довжини хвилі від 1460 нм до 1625. Затухання волокна G.655 є низьким при 1460-1625 нм, але коли довжина хвилі менше 1530 нм, дисперсія занадто низька для системи WDM. Тому волокно G.656 не підходить для додатків, що працюють від 1460 нм до 1530 нм [12].

G.657 - Нечутливе до вигину одномодове волокно для систем FTTH. Це останнє видання стандарту одномодового оптичного волокна, яке визначає характеристики нечутливих до вигину одномодових оптичних волокон. Волокна G.657 в основному застосовуються для широкосмугових оптичних мереж доступу в телекомунікаційних офісах і клієнтських приміщеннях у багатоквартирних і одноквартирних будинках. Існує дві категорії ITU-T G.657: G.657.A та G.657.B [12].

Таблиця 1.5 – Особливості ОВ G.656

	характеристики	Покриття довжини хвилі	Додатки
G.656	Максимальне загасання при 1460, 1550 і 1625 нм. Макс. PMDQ=0,2 пс/√км	Діапазон S, C і L	Підтримує системи CWDM і DWDM в діапазоні довжин хвиль від 1460 нм до 1625 нм.

Таблиця 1.6 – Втрати на макровигині

Втрати на макровигині	Радіус	30 мм
	Кількість витків	100
	Максимальне значення при довжині хвилі 1625 нм	0,50 дБ

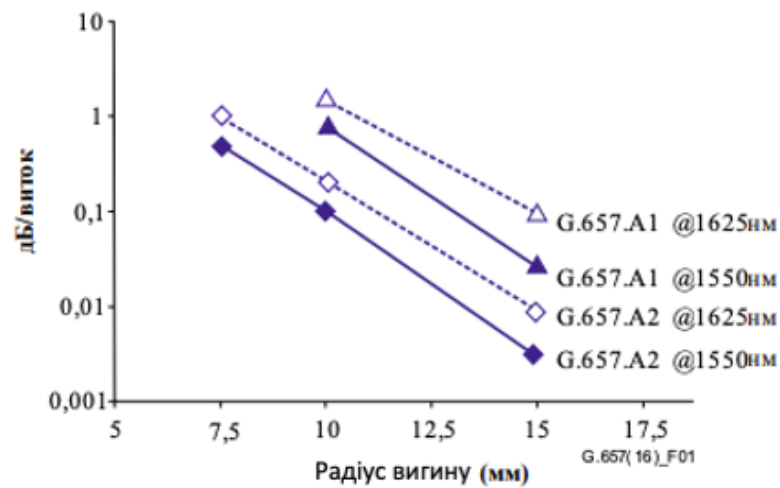


Рисунок 1.17 – Втрати на макровигині для категорії ІТУ-Т G.657.A [10]

Таблиця 1.7 – Особливості ОВ G.657

	характеристики	Покриття довжини хвилі	Додатки
G.657.A	При радіусі 15 мм, 10 обертів, 0,25 дБ макс. при 1550 нм, 1 дБ макс. при 1625 нм. Макс. PMDQ=0,20 пс/√км	від O до L смуги	Оптимізована установка доступу щодо макрозгинання, втрат, інші параметри подібні до G.652.D.
G.657.B	При радіусі 15 мм, 10 обертів, 0,03 дБ макс при 1550 нм, 0,1 дБ макс при 1625 нм	від O до L смуги	Підтримує оптимізоване встановлення мережі доступу з дуже малими радіусами вигину, що застосовуються в системах керування оптоволоконном, особливо для встановлення на обмеженій відстані.

Таблиця 1.8 – Втрати на макровигині

		ITU G.657.A1		ITU G.657.A2			
		15	10	15	10	7,5	
Втрати на макровигині у вільному кабелі	Радіус						М М
	Кількість витків	10	1	10	1	1	
	Максимальне значення при 1550 нм	0,25	0,75	0,03	0,1	0,5	дБ
	Максимальне значення при 1625 нм	1,0	1,5	0,1	0,2	1,0	дБ

		ITU G.657.B2			ITU G.657.B3			
		15	10	7,5	10	7,5	5	
Втрати на макровигині у вільному кабелі	Радіус (мм)							М М
	Кількість витків	10	1	1	1	1	1	
	Максимальне значення при 1550 нм	0,03	0,1	0,5	0,03	0,08	0,15	дБ

Продовження таблиці 1.8

	Максимальне значення при 1625 нм	0,1	0,2	1,0	0,1	0,25	0,45	дБ
--	----------------------------------	-----	-----	-----	-----	------	------	----

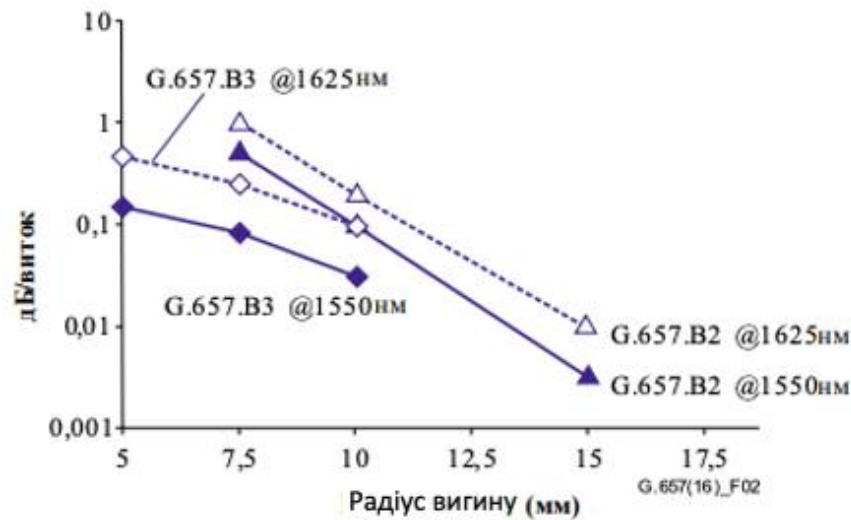


Рисунок 1.17 – Втрати на макровигині для категорії ITU-T G.657.B [10]

1.6 Висновки до розділу 1

Було досліджено, що оптоволоконний зв'язок відіграє життєво важливу роль у зв'язку завдяки своїй величезній пропускній спроможності і є перспективним вектором розвитку мереж. Це призвело до появи множини додатків, таких як FTTH. Він пропонує вигоду економічно ефективним способом, підтримує технології для мереж доступу наступного покоління. Пасивні оптичні мережі (PON) вважаються перспективним способом реалізації FTTH. А FTTH у свою чергу надає безліч послуг, таких як обмін відеофайлами, однорангова передача, відео за запитом (VoD) та інтернет-телебачення (IPTV) і т.д.

Визначено суть технології PON - між центральним і абонентськими вузлами створюється повністю пасивна оптична мережа деревовидної топології. І при аналізі різноманітних технологій PON було зроблено висновок, що GPON на даний момент є найбільш ємною через велику кількість абонентських вузлів і

забезпечує більш швидкісне з'єднання, підтримує IP-фрагментацію та захист даних.

Отже, оптичне волокно має найвищу пропускну здатність серед усіх існуючих засобів зв'язку. Найпоширеніший матеріал для виготовлення волокна – плавлений кварц, який за своїми електричними властивостями є діелектриком. Також є поділ на одномодове і багатомодове волокно. Одномодовий оптичний кабель - це одна підставка зі скловолокна діаметром від 8,3 до 10 мікрон, яка має один режим передачі та забезпечує вищу швидкість передачі і до 50 разів більшу відстань, ніж багатомодове, але коштує дорожче. Багатомодовий оптичний кабель складається з кількох скляних волокон із загальним діаметром у діапазоні від 50 до 100 мікрон та забезпечує високу пропуску здатність на високих швидкостях на середніх відстанях. Тому багатомодове оптичне волокно здебільшого використовується для зв'язку на коротких відстанях, наприклад, у межах будівлі чи на території університету.

Таким чином волоконно-оптичні кабелі застосовуються для створення волоконно-оптичних ліній зв'язку, здатних забезпечити найвищу швидкість передачі. Швидкість передачі може становити десятки гігабайт і навіть терабайт на секунду – залежить це від типу використовуваного активного устаткування. Застосування ВОЛЗ дозволяє локально поєднати робочі місця, також забезпечити високу швидкість завантаження Інтернету одночасно на всіх машинах, якісний телефонний зв'язок та телевізійний прийом.

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ WDM-PON ТА XG-PON

2.1 Принципи пасивних оптичних мереж

Оптичні мережі можна розділити на два класи - активні та пасивні. Між вузлом доступу та кінцевим користувальницьким обладнанням активної мережі є активне обладнання (наприклад, регенератор або комутатор). У пасивній мережі активне обладнання відсутнє, тобто мережа складається лише з пасивних компонентів.

Зазвичай використовуються такі види пасивних компонентів (крім оптичного волокна): волоконно-оптичні з'єднувачі, розгалужувачі та мультиплексори WDM.

Замість повної назви «пасивна оптична мережа» використовується аббревіатура PON (Passive Optical Network). Загальна структура мережі PON представлена на рис. 2.1. У мережах PON використовується топологія «точка-багатоточка» (P2MP, point-to-multi point).

Активне обладнання в центральному офісі або на вузлі доступу називається оптичним лінійним терміналом (Optical Line Terminal - OLT), а обладнання на абонентському вузлі - оптичним мережевим пристроєм (Optical Network Unit - ONU) є ще ONT. Деякі послуги зв'язку, які зазвичай надаються мережами PON, також показані на рис. 2.1.

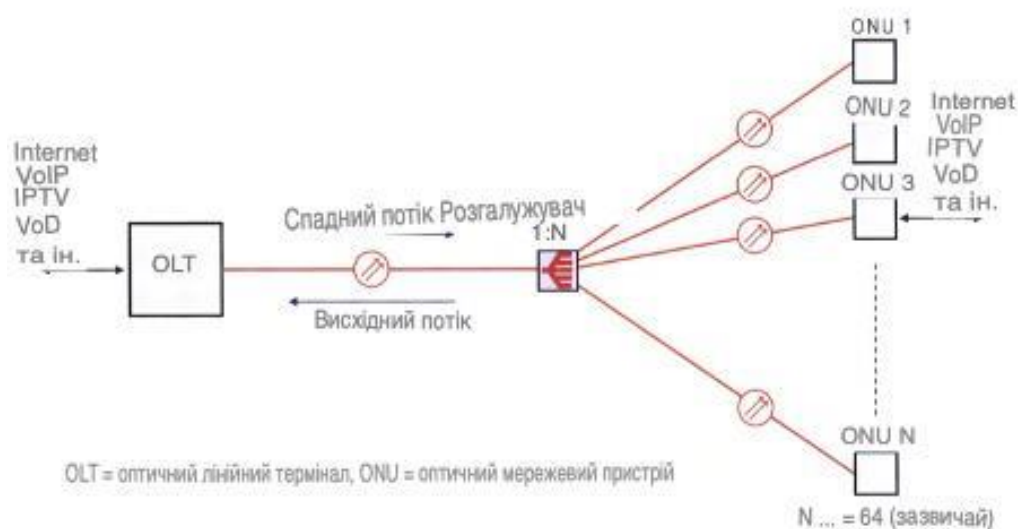


Рисунок 2.1 – Структура мережі PON

У переважній більшості мереж PON зв'язок організується по одному волокну. Комплект обладнання OLT на вузлі доступу обслуговує одне магістральне волокно, яке розподіляється між кількома абонентами за допомогою волоконно-оптичного розгалужувача. Коефіцієнт розгалуження може досягати 64, у цьому випадку один комплект обладнання OLT обслуговує 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 комплекти обладнання ONU. Один комплект обладнання ONU також може обслуговувати кількох абонентів [5].

Передавання і приймання інформації здійснюється по одному оптичному волокну в двох напрямках: у прямому напрямку (від станції до абонента) використовують довжину хвилі 1490 нм, а у зворотному (від абонента до станції) – 1310 нм. Для забезпечення передачі всім абонентам телевізійного сигналу використовують довжину хвилі 1550 нм [20].

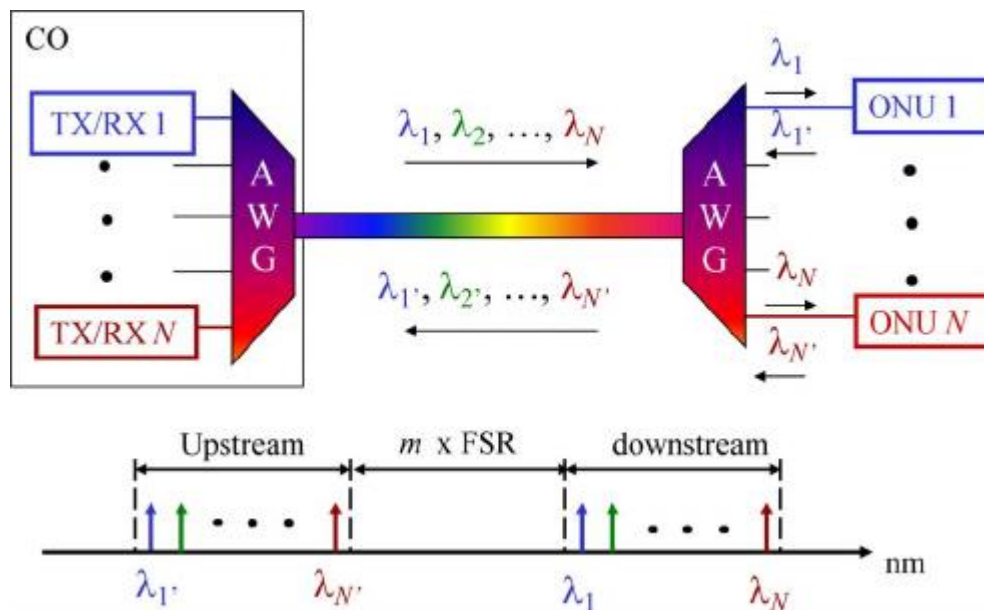


Рисунок 2.2 – Сутність технологій PON

Для збільшення пропускної спроможності одного волокна може використовуватися технологія спектрального мультиплексування WDM (Wavelength Division Multiplexing), що дозволяє одночасно передавати кілька сигналів на різних довжинах хвиль по одному волокну. При цьому вплив сигналів

один на одного у процесі їх передачі практично відсутній. Основні типи WDM технології з наведеними нижче характеристиками:

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing - Грубе спектральне мультиплексування):

- Довжини хвиль визначаються рекомендацією ITU-T G.694.2.
- Максимально використовується 18 довжин хвиль з інтервалом 20 нм в діапазоні 1270...1610 нм

- Застосовно для місцевих мереж та мереж доступу
- Тип волокна визначається рекомендацією ITU-T G.652.D

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing - Щільне спектральне мультиплексування), ITU-T G.694.1

- Довжини хвиль визначаються рекомендацією ITU-T G.694.1
- Інтервал між довжинами хвиль може становити 0,8; 0,4; 0,2 або 0,1 нм
- Застосовується для протяжних мереж з дуже високою пропускнуою здатністю
- Типи волокон визначаються рекомендаціями ITU-T G.652, G.655 та G.656 [5]

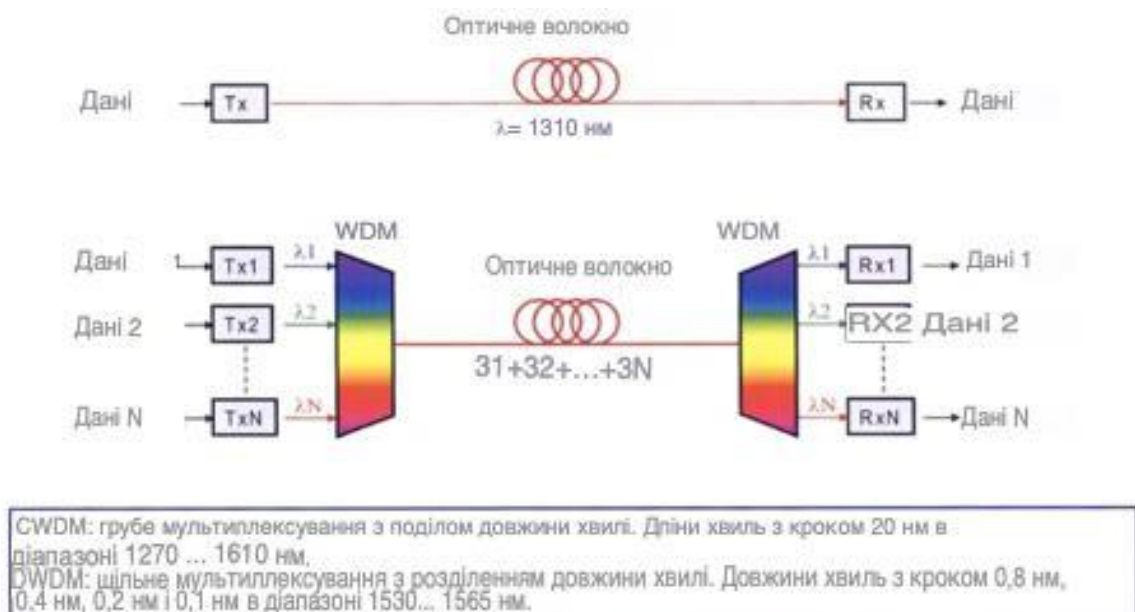


Рисунок 2.3 – Збільшення пропускнуої спроможності волокна шляхом використання технології WDM

Технологія WDM дозволяє багаторазово збільшити пропускну здатність волокна та досягти дуже високої швидкості передачі.

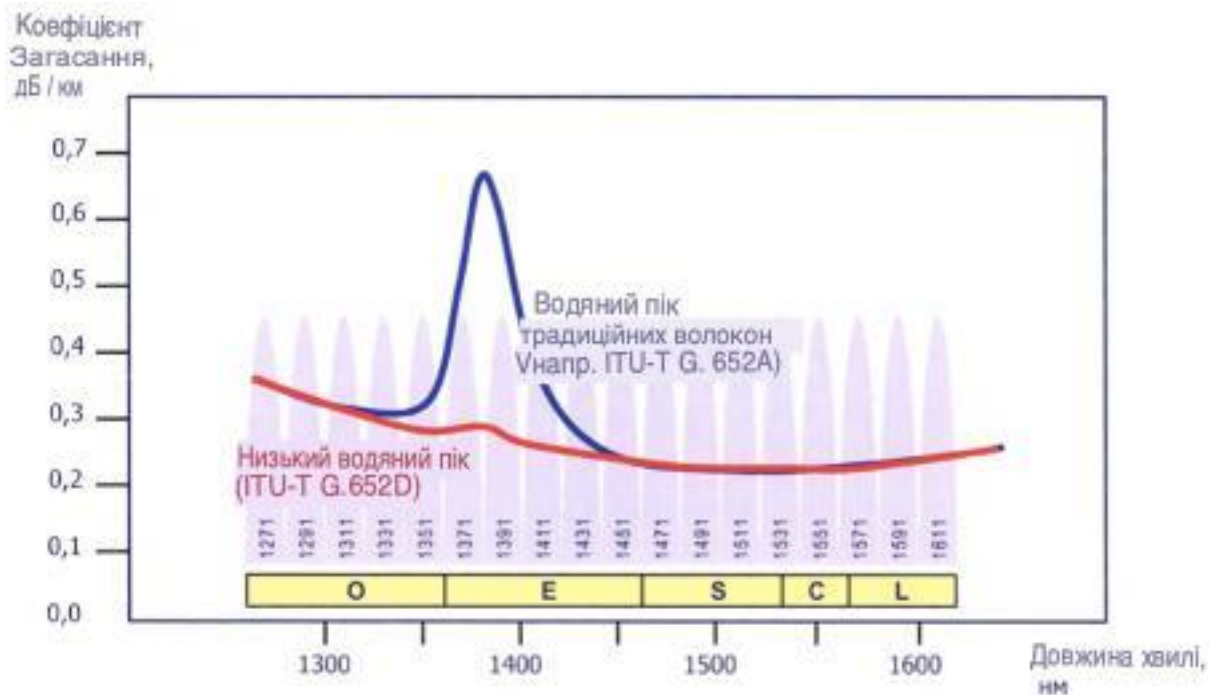


Рисунок 2.4 – Просторове розташування каналів CWDM відповідно до рекомендації ITU-T G.694.2

2.2 Технологія WDM PON

Мережі PON називають мережами TDM PON, оскільки висхідний потік від ONU до OLT у них формується шляхом виділення кожному ONU свого інтервалу часу для передачі даних. Інший підхід полягає у виділенні кожному ONU своєї довжини хвилі та формуванні висхідного потоку з використанням спектрального мультимплексування (WDM). Мережі PON, що використовують цю технологію, називають мережами WDM PON. Принцип дії мережі WDM PON показано на рис. 2.5 [5].

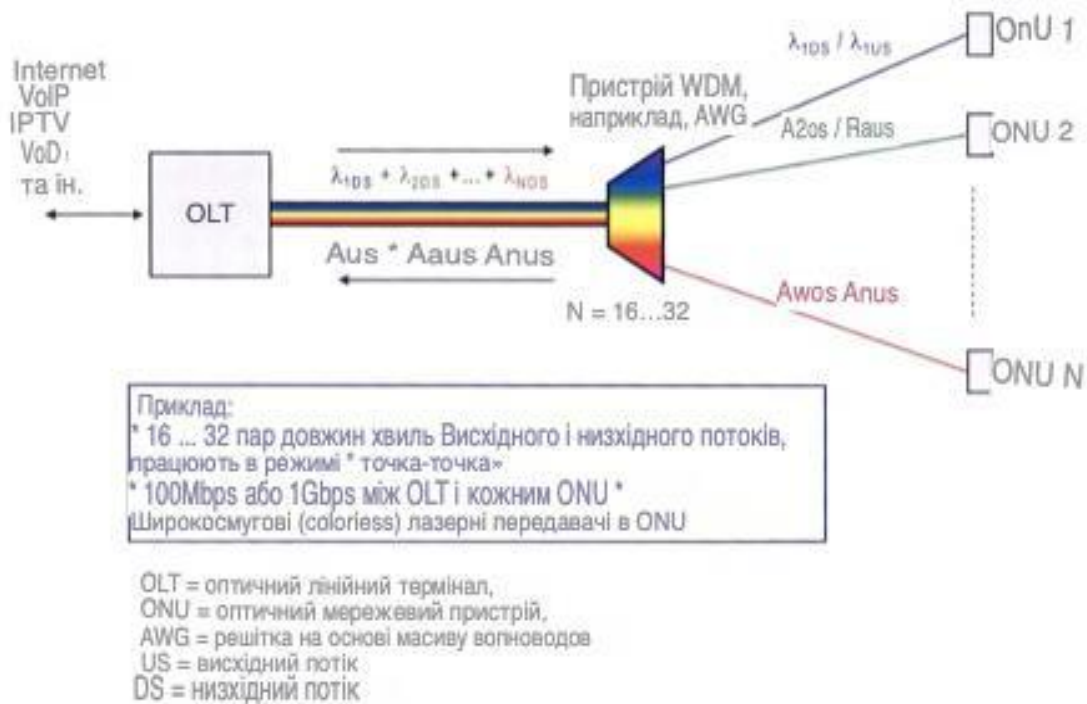
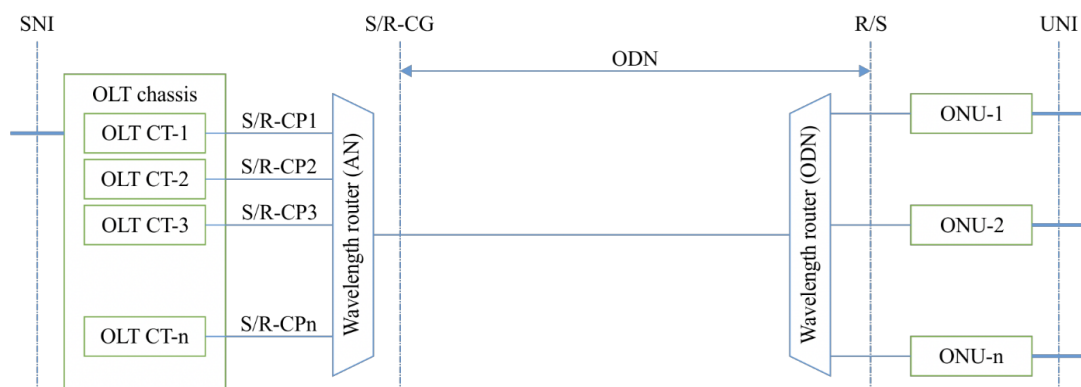


Рисунок 2.5 – Мережа WDM PON

Ці мережі дуже перспективні, їх основними перевагами є:

- Прозоре комплексне рішення від OLT до ONU та від ONU до OLT
- Для сигналу певної довжини хвилі мережа має топологію «точка-точка», що гарантує Тбіт/с (55x20 Гбіт/с і 25x20 Гбіт/с) пропускну здатність та безпеку.
- Зміна швидкості передачі та/або набору послуг, наданих абоненту, не потребує перерви в обслуговуванні інших абонентів [5]

Далі можемо побачити на рис 2.6. функціональну архітектуру WRP.



G.9802.1(21)

Рисунок 2.6 – Функціональна архітектура WRP

Складовими частинами системи пасивної оптичної мережі з розділенням за довжинами хвиль є шасі оптичного лінійного терміналу (OLT) з обладнанням термінації декількох каналів (CTs), кожний з яких забезпечує двонаправлене з'єднання через пару довжин хвиль, що утворюють пару оптичних каналів (CP), оптичної розподільчої мережі та на приймальній стороні з оптичних мережевих блоків та роутера, що виконує розділення і маршрутизацію за довжинами хвиль.[ITU-T G.9802] [21].

OLT CT: Кожен із фізичних портів у оптичному лінійному терміналі (OLT), який підключається до волокна оптичної розподільчої мережі (ODN), є точкою термінації каналу (CT). У контексті передачі на основі маршрутизації за довжинами хвиль це інтерпретується як термінація пари каналів (CP): одного каналу на довжині хвилі у низхідному напрямі від OLT до ONU і другого каналу на довжині хвилі у висхідному напрямі від ONU до OLT [21].

Пасивний маршрутизатор WR розподільчої мережі ODN виводить каналну пару CP каналної групи CG через відповідний фізичний порт. Кожна точка термінації каналу CT, що знаходиться в OLT, пов'язана з однією каналною парою CP через ODN з функцією маршрутизації за довжиною хвилі. Також можливі варіанти, в яких каналні пари CP походять з різних шасі OLT, а ONU отримує кілька CP.

Підтримуються наступні симетричні лінійні швидкості для каналної пари CP: 25 Гбіт/с; 10 Гбіт/с. Одночасна підтримка 25 Гбіт/с CT та 10 Гбіт/с CT можлива на різних CP. Номінальна швидкість лінії на CP може бути змінена шляхом заміни CT. Для розподільчої мережі WR-ODN використовуються CP 12/20/40 довжин хвиль каналних пар. Система ONU WRP не залежить від довжини хвилі та може використовувати будь-який порт роутера WR в ODN для підключення ONU [21].

Структура шарів системи WRP показана в таблиці 2.1 та 2.2. Еталонна модель протоколу розділена на рівень конвергенції передачі (TC) і рівень, залежний від фізичного середовища (PMD). Рівень конвергенції передачі розділений на підрівень передачі PON і підрівень адаптації, які відповідають підрівню конвергенції передачі додаткових блоків, що передають різні типи

даних. Підрівень передачі PON завершує необхідну функцію передачі на ODN. Специфічні функції PON завершуються підрівнем передачі PON.

Міжнародним союзом електрозв'язку було визначено два основні сценарії для побудови систем з WDM PON :

- a) “Грінфілд”, у якому буде побудована нова розподільна мережа;
- b) “Браунфілд”, у якому WRP буде використовуватися для модернізації існуючої одноволоконної лінії.

Для сценарію з новою мережею оптичний бюджет не обмежений, конвергенція з існуючими добре стандартизованими бюджетними класами є кращою, щоб максимізувати вигоду від існуючих оптоелектронних модулів. Оптичні бюджетні класи [ITU-T G.989] і [ITU-T G.9806] розглядатимуться для повторного використання. Якщо системи WRP призначені для модернізації, потрібна здатність підтримувати існуючі оптичні бюджетні класи ODN типу «точка-точка», визначені в [ITU-T G.986] і [ITU-T G.9806]. Таким чином, при модернізації необхідні рішення для оптичних бюджетних класів із додаванням внесених втрат пристрою WR. На додаток до параметрів швидкості лінії та відстані, потрібне врахування СТ/СР з різними оптичними бюджетними класами [21].

Технологія “платіть у міру зростання (PAYG)” - використання оптичних модулів дає можливість контролювати як витрати на встановлення, так і енергозбереження. Можлива заміна трансиверів на основі кожного СР, щоб зробити можливим майбутній перехід технологій або до вищих лінійних швидкостей, або до менш енергоємних рішень.

Система WDM PON повинна підтримувати використання оптичних волокон, типів G.652 і G.657 і максимальні класи відстані оптоволоконна:

- від 0 до 10 км для бездротового застосування, що чутливе до затримки;
- від 0 до 20 км для більш загального призначення та для відповідності мінімальному радіусу дії PON ODN, що модернізується.

Таблиця 2.1 – Приклади інтерфейсів UNI та сервісів

UNI	Фізичний інтерфейс	Сервіс
1 Gbit/s /10 Gbit/s /25 Gbit/s Ethernet UNI інтерфейс по мідному кабелю [IEEE 802.3]	1000/10G/25G BASE	Ethernet, Ethernet на базі інтерфейсу eCPRI
1 Gbit/s/10 Gbit/s/25 Gbit/s UNI інтерфейс по оптичному кабелю [IEEE 802.3]	1000/10G/25G BASE	Ethernet, Ethernet на базі інтерфейсу eCPRI
загальнодоступний радіоінтерфейс (CPRI) / Ініціатива відкритого стандарту базової станції (OBSAI)	Option2, Option3 Option7, Option8, Option10	безпроводова ближня зона
1 PPS	1PPS	інтерфейс синхронізації

Таблиця 2.2 – Приклади інтерфейсів SNI та сервісів

SNI	Фізичний інтерфейс	Сервіс
1 Gbit/s / 10 Gbit/s / 25 Gbit/s 40 Gbit/s / 50 Gbit/s 100 Gbit/s / 200 Gbit/s / 400 Gbit/s – [IEEE 802.3]	1G/10G/25G/40G/50G/100 G/ 200G/400G BASE	Ethernet, Ethernet на базі інтерфейсу eCPRI
CPRI/OBSAI	Option2, Option3, Option7, Option8	

WRP дозволяє додавати ONU та OLT CT і створювати нові з'єднання, які не впливають на обслуговування потоків трафіку, що працюють. Проте у такому випадку активація модулів проводиться окремо та необхідно врахувати пропорційність споживання електроенергії до активованих CP.

Метою технології WDM PON є скорочення експлуатаційних витрат на системи PON без істотного збільшення капітальних витрат з включенням всіх

необхідних тестових і діагностичних можливостей і забезпечення сумісності з необхідною пропускною здатністю та продуктивністю часу передачі, необхідних для цільових послуг [21].

Функції тестування та діагностики є обов'язковими для підтримки обладнання, мережі, послуг, і це не повинно впливати на обслуговування. Для WRP застосовують поточні можливості PON (аварійні повідомлення, події, звіти) щодо базового тестування та діагностики. Враховуючи успадкованість ONU з оптичним доступом, розроблену для передачі PON або BiDi з точки до точки, необхідна взаємна сумісність:

– передача ONU може розпочатися лише після розпізнавання явного запиту на передачу, отриманого від OLT CT;

– оскільки локальні фрейми WDM PON є необов'язковими, а параметри пропускної здатності не надаються, потрібна ідентифікація ONU, вказуючи, що канал неактивний і має бути захищений:

- На стороні ONU розпізнавання явного повідомлення вказує на те, що довжина хвилі висхідного потоку, пов'язана з довжиною хвилі низхідного потоку для створення CP, повинна надаватися OLT;

- Від сигналу у висхідному напрямі, OLT CT повинен гарантувати, що під час передачі він не зіткнеться з уже передавальним паралельним OLT CT, що працює на тій самій довжині хвилі. Таких ситуацій в певних схемах захисту необхідно запобігати.

Також передбачені системи захисту OLT, оптичної лінії та термінації каналу CTs [21].

Мережні архітектури WDM-PON можна класифікувати відповідно до топології таким чином:

- архітектура Point-To-MultiPoint (P2MP), що виникає на основі топології TDM-PON,
- архітектура RING.

1. Архітектура P2MP мережі WDM-PON.

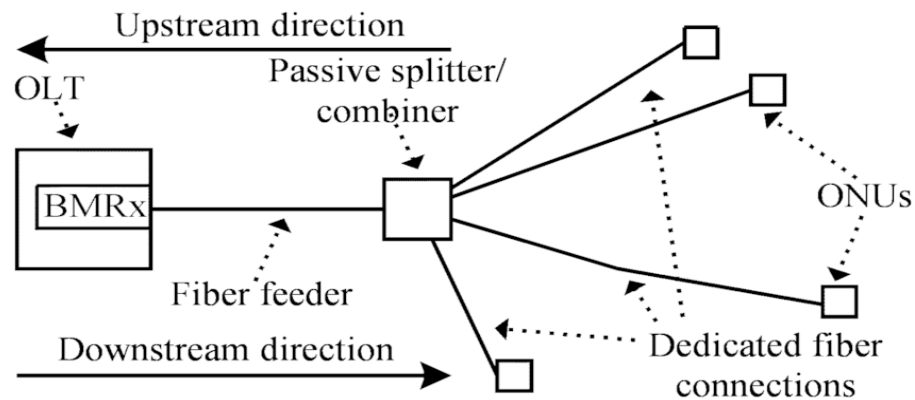


Рисунок 2.7 – Архітектура P2MP мережі WDM-PON

Для створення такої мережевої архітектури P2MP необхідно реалізувати автономний канал завдовжки хвилі від терміналу OLT до шкірного блоку ONU як для низхідного, так і для висхідного напрямків. Завдяки цьому між обладнанням OLT і ONU створюється з'єднання «точка-точка», де кожен блок ONU може працювати на швидкості передачі даних до загальної швидкості потоку даних виділеного каналу довжини хвилі. Крім того, канали з різними довжинами хвиль можуть працювати на різних бітрейтах, підтримуючи різні варіації послуг.

2. Архітектура RING мережі Access WDM-PON.

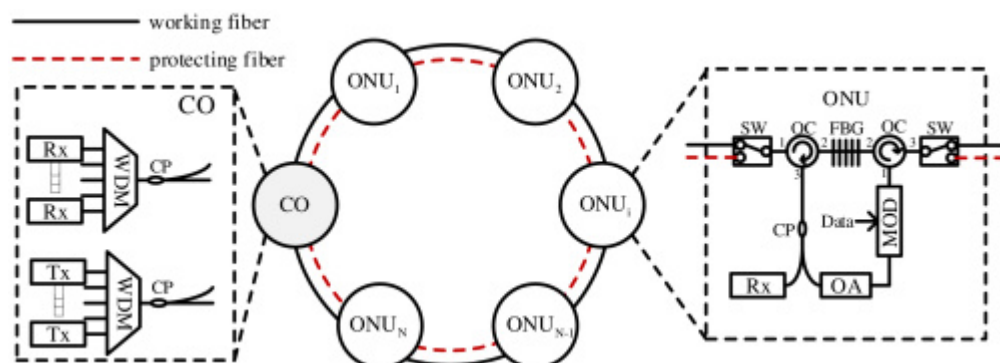


Рисунок 2.8 – Архітектура RING мережі Access WDM-PON

Ця архітектура доступу RING з'єднує блоки ONU в кільцевій топології, де термінал OLT підключений до цього кільця через двонаправлені оптичні.

Обладнання OLT і ONU необхідно змінити для передачі та прийому оптичних сигналів у низхідному та висхідному напрямках. Запропонована архітектура доступу RING також може підтримувати повторну модуляцію оптичних сигналів для підвищення ефективності передачі виділених каналів завдовжки хвилі. Ця архітектура пропонує перевагу гнучкого розподілу довжини хвилі, коли одному блоку ONU можна назначити більше каналів довжини хвилі для збільшення пропускної здатності передачі та кращої масштабованості мережі.

3. Архітектура RING мережі Metro-Access WDM-PON.

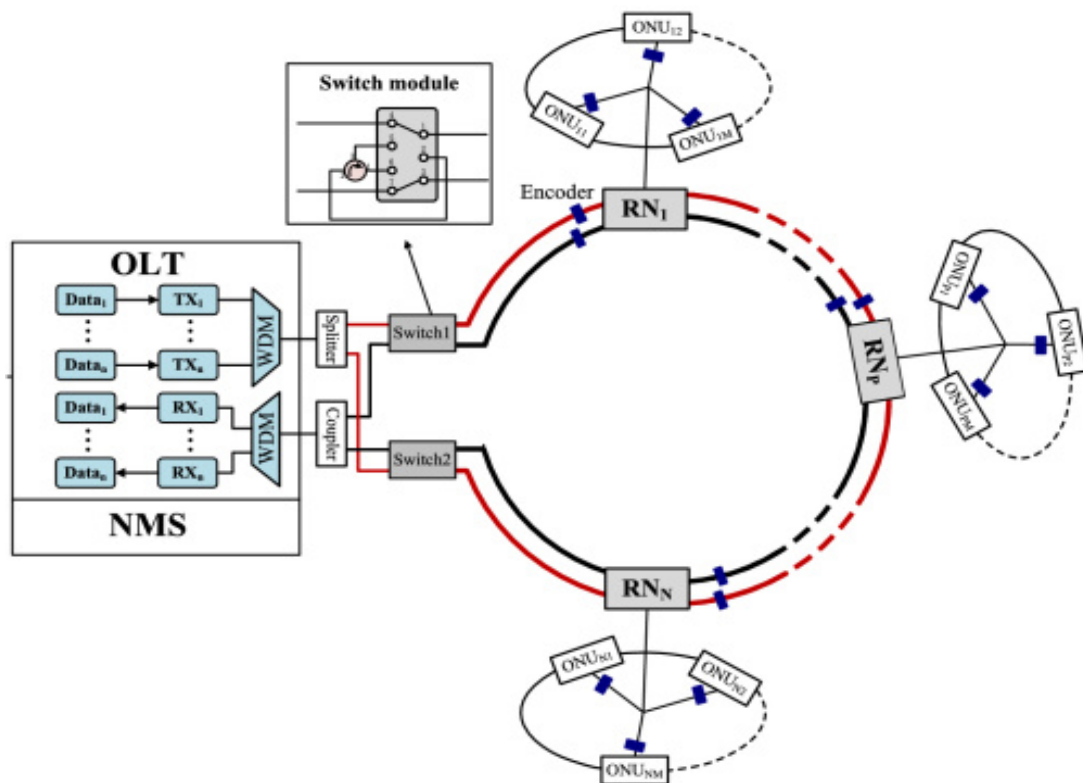


Рисунок 2.9 – Архітектура RING мережі Metro-Access WDM-PON

Цю архітектуру метро-доступу RING іноді називають пасивною оптичною мережею великого радіусу дії (LR). Він утворений кільцем WDM із задіяними пасивними елементами AWG. Конкретний елемент AWG потім спрямовується до гілки доступу TDM. За допомогою волоконних підсилювачів, легованих ербієм (EDFA), в оптичному волокні можна використовувати два L- та C-діапазони. При створенні цієї архітектури метро-доступу RING можна вибрати різні коефіцієнти

розподілу для оптичних розгалужувачів потужності, а також можливе підключення двох гілок TDM до однієї WDM RN з елементом AWG.

Кільцева підмережа метро має модульні можливості підключення великої кількості користувачів в межах допустимих значень загасання. Це досягається волокнами, легованими ербієм, дистанційно накачуються з терміналу OLT. Можливі значення бюджету потужності можна регулювати відповідно до тривалості волокон та характеристик потужності лазерів. Підмережа гілки доступу створюється мережею TDM-PON, де волокно розподілу (DF), підключене до елемента AWG, спрямовується до вузла TDM RN з елементом оптичного комутатора (OS). Після цього він поділяється на одиниці ONU через кінцеве волокно розподілу крапель (DDF) [15].

Технологія WDM PON безперервно розвивається, її економічна ефективність зростає. Тому в найближчі кілька років технологія WDM PON може стати однією з основних мереж доступу. Ключовими компонентами такої мережі є широкосмугові лазери ONU і мультиплектори/демультиплектори AWG (Arrayed waveguide grating) на основі масивів планарних хвилеводів [5].

В роботі показано симуляцію, налаштовану для односпрямованої WDM PON з 2 користувачами (рис 2.10). Односпрямований WDM PON був змодельований з використанням довжин хвиль 1490 нм та 1491 нм для двох користувачів з різною довжиною волокна. Тут OLT, блок передавача, складається з двох визначальних користувачем генераторів бітових послідовностей, генераторів імпульсів NRZ, лазерів безперервної дії і модуляторів Маха-Цендера, кожен з яких відповідає довжинам хвиль 1490 нм і 1491 нм. За допомогою генераторів бітових послідовностей, що визначаються користувачем генераторів, сигнал даних генерується з тією ж швидкістю передачі даних, що і TDM PON. Згенерований сигнал кодується за допомогою генератора імпульсів NRZ. Довжини хвиль встановлені як 1490 нм та 1491 нм, а потужність як 0,2 дБм у лазерних джерелах безперервної хвилі (CW). Модулятор Маха-Цендера (MZM) є оптичним модулятором, який використовується для зміни інтенсивності світла від лазера CW відповідно до вихідного сигналу генератора імпульсів NRZ. Вихідний

сигнал модулятора Маха-Цендера передаватиметься на ONU оптоволоконним каналом [13].

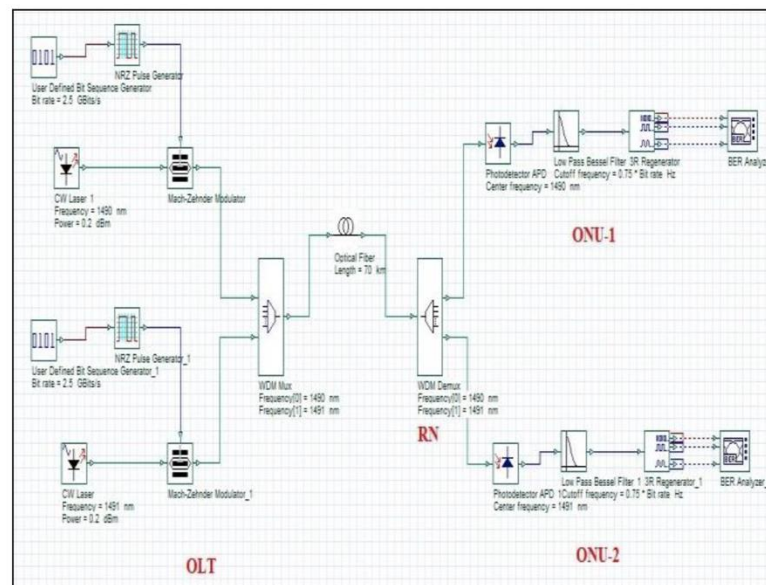


Рисунок 2.10 – Симуляційний макет односпрямованого WDM PON

Мультиплексор WDM, присутній у OLT, використовується для об'єднання цих сигналів і передачі у вигляді єдиного оптичного сигналу волокну. Демультиплексор WDM формує віддалений вузол (RN), який поділяє сигнали, що відповідають кожній з ранніх довжин хвиль, і ONU з відповідними довжинами хвиль приймають сигнали. Блок ONU такий же, як і у TDM PON, який включає фотодетектор APD, фільтр нижніх частот Бесселя, регенератор 3R і аналізатор BER.

Продуктивність односпрямованої системи WDM PON з 2 користувачами також аналізується з використанням таких параметрів, як Qfactor та частота помилок по бітам (BER). На рисунку 2.11 показано залежність добротності від відстані для односпрямованої системи WDM PON [13].

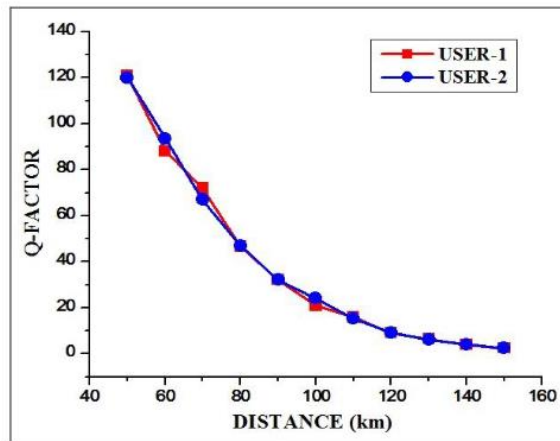


Рисунок 2.11 – Зв'язок Q-фактора з відстанню для односпрямованого WDM PON з 2 користувачами

Графік пояснює, що значення добротності змінюється з відривом від 50 до 150 км при вхідній потужності 0,2 дБм. Графіки показують, що із збільшенням відстані добротність зменшується. Можна бачити, що при використанні WDM PON якість сигналу, що приймається, і відстань, що покривається переданим сигналом, збільшилися в порівнянні з системою TDM PON [13].

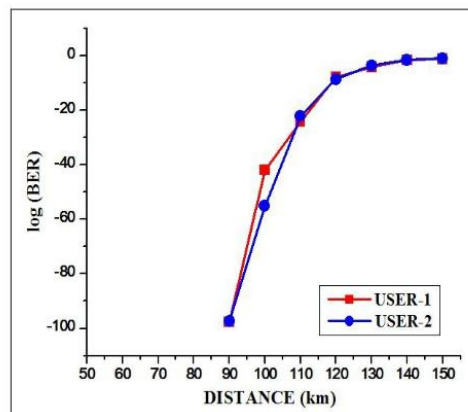


Рисунок 2.12 – Зв'язок логарифму (BER) із відстанню для односпрямованого WDM PON з 2 користувачами

На рис. 2.12 показано співвідношення між логарифмом (BER) та відстанню для односпрямованої PON WDM з 2 користувачами. Значення BER також змінюється на відстані від 50 до 150 км. при вхідній потужності 0,2 дБм. Графік

показує, що зі збільшенням відстані логарифм (BER) збільшується. Тут також видно, що при використанні WDM PON кількість помилок у прийнятому сигналі зменшилася, а відстань, що покривається сигналом, що передається, збільшилася в порівнянні з системою TDM PON[13].

На рис. 2.13 представлено архітектуру WDM PON. OLT, розміщений в CO, має набір лазерних джерел, що перебудовуються, або лазерних джерел з фіксованою довжиною хвилі, що використовуються для передачі низхідного трафіку в ONU. Кожному користувачеві було призначено фіксована частота, де працює лазер. Виділення частот може бути постійним або ґрунтуватися на вимогах до необхідної смуги пропускання. Потім дані передаються на мультиплексор, який об'єднує всі дані разом і відправляє їх оптоволоконном довжиною від 20 до 100 км.

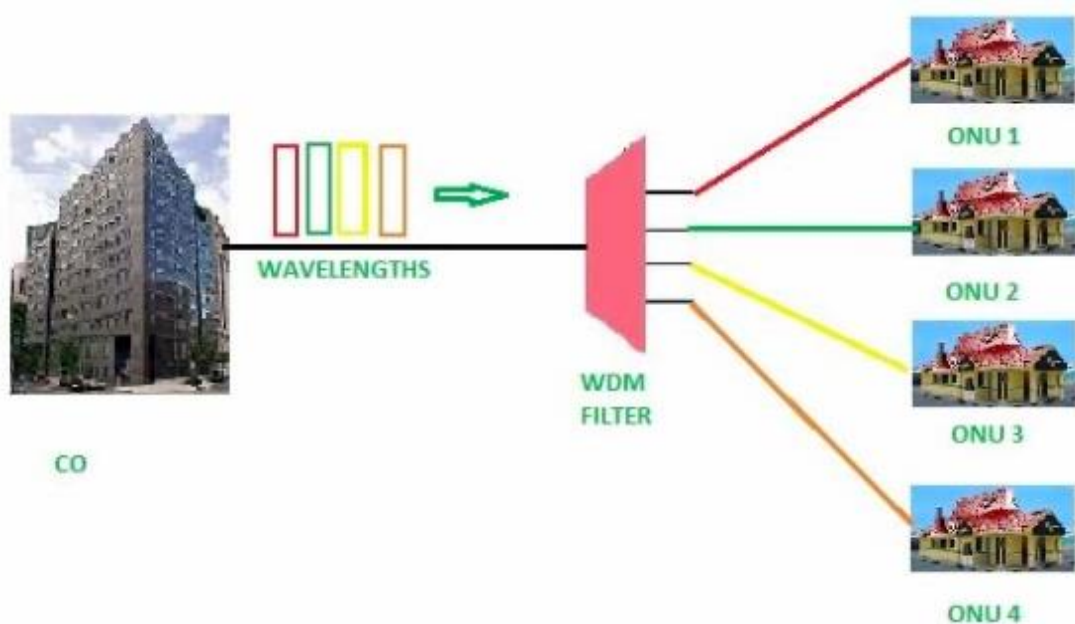


Рисунок 2.13 – Модель WDM PON

Оптичне волокно, що йде з центрального офісу, підключається до пасивного демультиплексора WDM. Його функція полягає в тому, щоб розділити світло в залежності від довжини хвилі та передати його у відповідний ONU. ONU знову використовує оптоелектронний компонент і перетворює світловий сигнал на електричний сигнал, після чого дані витягуються [14].

Аналіз надійності мережі базується на представленнях блок-схеми надійності (RBD) через їх значні переваги, включаючи точність, гнучкість, простоту та візуальний ефект. Вони дозволяють визначити загальну доступність мережі для даної схеми захисту. У схемі RBD кожен компонент включається як простий блок у співвідношенні з сусідніми блоками. З'єднання в заданій схемі захисту ілюструють незахищені (послідовні) та/або захищені (паралельні) компоненти (рис 2.14.). Діаграми RBD (a)–(d) представляють сценарії захисту P2MP WDM-PON відповідно до стандарту ITU-T для мережі TDM-PON. Діаграми RBD (e)–(h) визначають сценарії захисту RING WDM-PON [15].

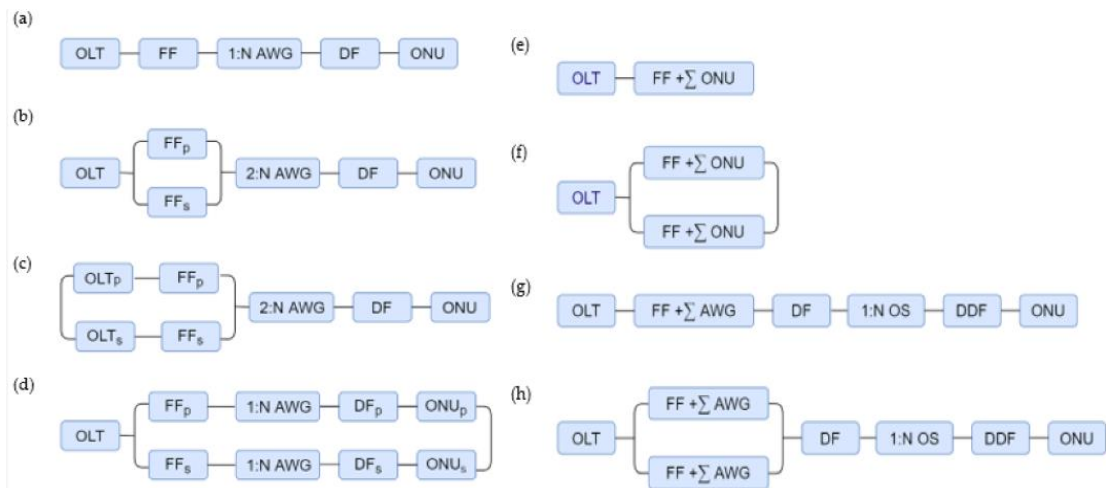


Рисунок 2.14 – Діаграми RBD для схем захисту WDM-PON (a) незахищена мережа P2MP, (b) захист типу В, (c) подвійний захист типу В, (d) захист типу С, (e) незахищений доступ RING мережа, (f) захищена мережа доступу RING, (g) незахищена мережа доступу до метро RING, (h) захищена мережа доступу до RING

2.3 Технологія XG-PON

10-гігабітний PON (XG-PON) — це новий стандарт, випущений FSAN. XG-PON покращує GPON у багатьох аспектах. Помітні зміни включають збільшення швидкості передачі даних за умовчанням до 10 Гбіт/с і збільшення швидкості передачі даних до 2,5 або 10 Гбіт/с; мінімальний логічний розподіл збільшено до

256 (з 64 у GPON), а фізичний охоплення розширено до 60 км. Оскільки XG-PON може прокласти шлях для багатьох додатків із інтенсивним використанням пропускної здатності (телебачення Інтернет-протоколу, відео на вимогу, відеоконференції тощо), дуже важливо вивчити проблеми з продуктивністю, що виникають із розгортанням XG-PON [19].

Модуль XG-PON базується на серії рекомендацій G.987 від групи FSAN ITU. Ці рекомендації в основному визначають характеристики залежного від фізичного середовища (PMD) і рівня конвергенції передачі (TC) XG-PON. Стандарт XG-PON має багато схожості з GPON, наприклад його схема TDMA, яка використовується для спільного використання середовища, механізм забезпечення QoS і схема DBA, яка використовується для призначення пропускної здатності висхідного каналу. Однак потрібні деякі зміни для підтримки більшої кількості користувачів, вищої швидкості передачі даних і розширеного фізичного охоплення.

FSAN ITU-T опублікувала серію рекомендацій для XG-PON. ITU-T G.987 пояснює кілька важливих концепцій XG-PON; ITU-T G.987.1 представляє загальні вимоги, підтримувані послуги, специфікації обладнання та стек протоколів XG-PON, а також мережеву міграцію та співіснування XG-PON з GPON; ITU-T G.987.2 зосереджується на питаннях рівня PMD, таких як використовувана довжина хвилі та підтримувана швидкість передачі даних, тоді як ITU-T G.987.3 представляє деталі рівня TC для XG-PON. Крім протоколів для передачі даних, він також охоплює управління QoS і схему DBA для висхідної довжини хвилі. Ще одна пов'язана рекомендація — ITU-T G.988, яка визначає інтерфейс управління та контролю ONU (OMCI) як для GPON, так і для XG-PON. Рис 2.15 ілюструє загальні функції XG-PON і рекомендації, в яких вони вказані [19].

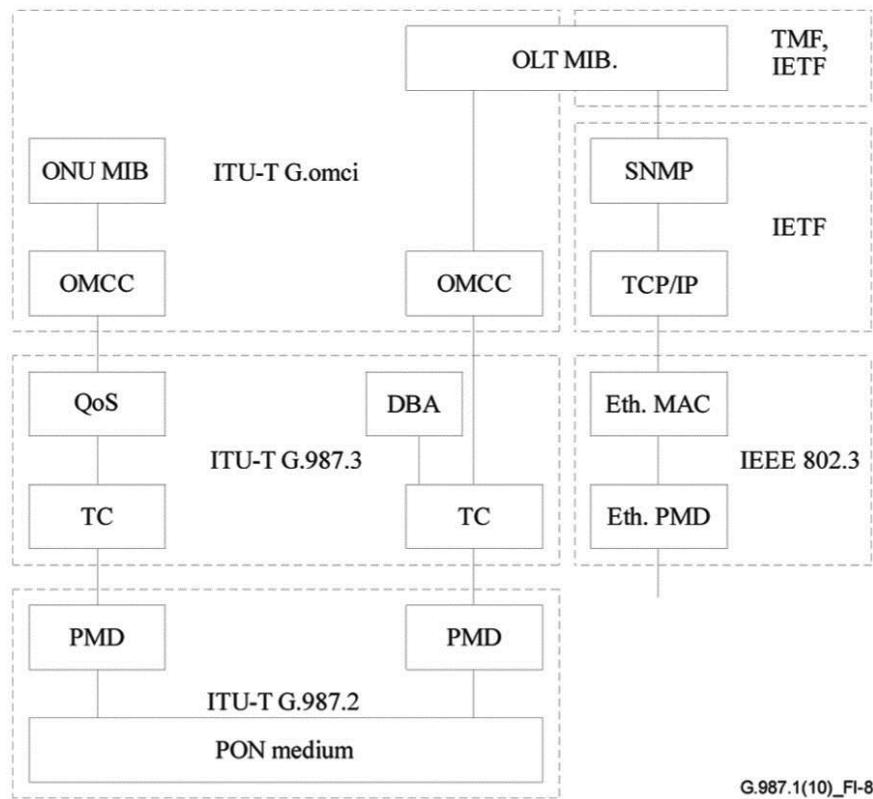


Рисунок 2.15 – Загальні функції XG-PON

XG-PON було запропоновано для різних сценаріїв розгортання для обслуговування різних клієнтів, таких як житлові будинки, підприємства та стільникові мережі. Щоб обслуговувати цих клієнтів, XG-PON перераховує послуги, які необхідно надавати, наприклад телефонію, високошвидкісний доступ до Інтернету, мобільний транспортний зв'язок тощо. XG-PON також представляє багато варіантів ONU, які надають різні функції та інтерфейси. Підводячи підсумок, XG-PON був добре стандартизований для надання повних послуг різним користувачам, які використовують оптичну мережу. Що стосується оптичної розподільчої мережі, то XG-PON може бути розгорнута як класична PON з охопленням до 60 км. Для підтримки довшого фізичного охоплення активні розширювачі охоплення можна застосовувати до та/або після пасивного розгалужувача для з'єднання кількох пасивних сегментів, що належать до однієї мережі XG-PON.

Рис 2.16 ілюструє загальну систему моделювання, яка використовує наш модуль XG-PON та інші компоненти для вивчення проблем продуктивності, які

можуть виникнути в XG-PON. OLT імітується як вузол, який має XgponOltNetDevice та інший мережевий пристрій, наприклад PointToPointNetDevice, для підключення до зовнішньої мережі. ONU імітується як вузол із XgponOnuNetDevice та інші мережеві пристрої (Ethernet, WiFi, WiMAX, LTE тощо) для підключення обладнання користувача до ONU. Наш модуль XG-PON взаємодіє безпосередньо з рівнем IP, а пакети IP є SDU. Це розумно, оскільки ми зосереджені на мережах FTTx, підключених до Інтернету [19].

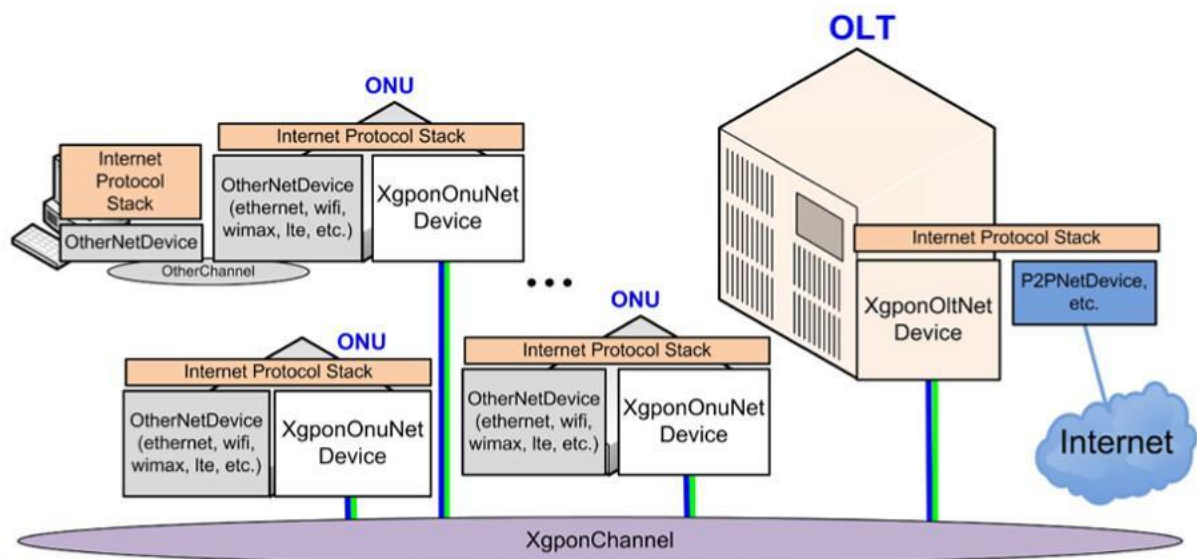


Рисунок 2.16 – Зразок середовища моделювання XG-PON

Фізичний рівень залежить від фізичного середовища (PMD), описаний у Рекомендації ITU-T G.987.2 і визначає гнучку оптико-волоконну мережу доступу, здатну підтримувати вимоги до високої пропускної здатності. Загальна вимога XG-PON — забезпечити більш високу швидкість передачі даних, ніж GPON, у поєднанні з мінімальними витратами. Тому зворотна сумісність із застарілими розгортаннями GPON була основною темою у специфікаціях фізичного рівня. Для досягнення зворотної сумісності та співіснування систем GPON і XG-PON оптичні довжини хвиль, вибрані для XG-PON, були «O-діапазон» (для висхідного потоку в діапазоні від 1260 до 1280 нм) і «1577 нм» (для низхідного потоку в діапазоні від 1575 до 1580 нм).

Системи XG-PON діляться на XG-PON1 (зі швидкістю висхідного потоку 2,5 Гбіт/с) та XG-PON2 (зі швидкістю 10 Гбіт/с). Серія рекомендацій ITU-T G.987.x стосується лише XG-PON1. Здається, що природний перехід від GPON до XG-PON1 та XG-PON2 відбудеться, коли технологія стане зрілішою.

Враховуючи, що системи XG-PON повинні використовувати ту ж оптичну розподільну мережу, що й GPON, характеристики ODN цілком зрозумілі (максимальні втрати 28 дБ у вікнах від 1260 до 1360 та від 1480 до 1580 нм). Оператори FSAN визначили два бюджети втрат для систем XG-PON. Номінальний клас 1 з максимальними втратами 29 дБ та номінальний клас 2 з максимальними втратами 31 дБ. Перший дозволяє XG-PON співіснувати зі стандартними системами GPON, а другий підтримує співіснування із надстандартними системами GPON із рівнем шуму 29,5 дБ [17].

Канальний рівень XG-PON (зазвичай званий рівнем конвергенції передачі - TC) складається з трьох окремих підрівнів: підрівня формування кадрів XGTC, підрівня адаптації PHY XGTC та підрівня адаптації послуг XGTC. Основна функція рівня TC полягає у забезпеченні транспортного мультиплексування між терміналом оптичної лінії (OLT) та ONU, за яким йдуть інші функції, такі як адаптація сигнальних протоколів клієнтського рівня, операції та обслуговування фізичного рівня (PLOAM), інтерфейс для динамічного розподілу смуги пропускання (DBA), дальність та реєстрація ONU. Функції XGTC реалізуються через Transmission CONTainers (T-CONT), кожен із яких ідентифікується унікальним ідентифікатором розподілу (Alloc-ID), що призначається OLT.

Підрівень адаптації послуги XGTC відповідає за отримання корисного навантаження користувача та її форматування для передачі через оптичну мережу. У системі XG-PON блоки службових даних (SDU), які включають кадри даних і високорівневі кадри управління PON, передаються в секції корисного навантаження XGTC з використанням методу інкапсуляції XG-PON (система XGEM). XGEM підтримує фрагментацію, інкапсуляцію та розмежування SDU як у низхідному, так і у висхідному напрямках, і маркує окремі потоки трафіку (порти), щоб їх міг прийняти відповідний клієнт з іншого боку PON.

Підрівень кадрів XGTC відповідає за побудову та розбір полів службових даних як на стороні передавача, так і на стороні приймача. На стороні передавача рівень формування кадрів приймає кадри XGEM від рівня адаптації послуги XGTC, а потім створює кадр XGTC у низхідному напрямку або пакет XGTC у висхідному напрямку, надаючи вбудовані поля заголовка каналу обміну повідомленнями OAM і PLOAM. На стороні приймача підрівень формування кадрів приймає кадри XGTC або пакети XGTC, аналізує поля службових даних, витягуючи вхідну інформацію OAM і потоки повідомлень PLOAM, а потім доставляє корисні навантаження XGTC на підрівень адаптації сервісу.

Підрівень адаптації РНУ забезпечує низькорівневе кодування кадру ТС по фізичному каналу, намагаючись покращити характеристики виявлення, прийому та опису сигналу, що передається середовищем. Більшість роботи рівня адаптації РНУ пов'язані з використанням прямої корекції помилок (FEC), необхідної функції низхідного і висхідного напрямів. Використання FEC покращує ефективну чутливість і характеристики перевантаження оптичного приймача за рахунок введення надмірності в бітовий потік, що передається, і дозволяє приймачеві працювати в сценаріях з більш високим BER (частотою помилок по бітах) [17].

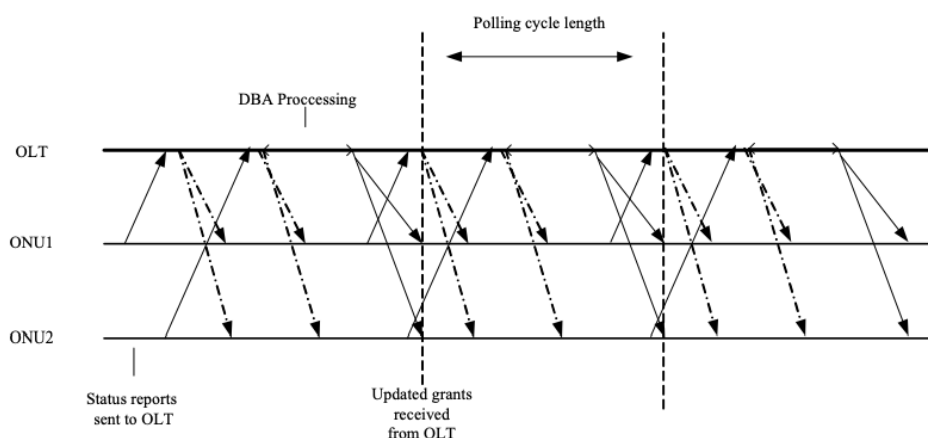


Рисунок 2.17 – Процес DBA в системах XG-PON

Динамічний розподіл смуги пропускання в XG-PON. У системі XG-PON OLT забезпечує контроль доступу до середовища для висхідного трафіку. Основна ідея полягає в тому, що кожен низхідний кадр постачається з картою пропускнуої здатності (BWmap), яка вказує розташування для висхідних передач різними ONU у відповідному висхідному кадрі PHY. Заголовок кадру низхідного потоку XGTC містить поле BWmap, яке вказує розподіл смуги пропускання для певного ідентифікатора виділення (Alloc-ID), тоді як у вихідному пакеті накладні витрати розподілу складаються зі структури звіту динамічної пропускнуої здатності висхідного каналу (DBRu) і містять Поле зайнятості буфера (BuffOcc), яке повідомляє про загальний обсяг трафіку SDU.

XG-PON використовує з'єднання «точка-багато точок» (P2MP) між OLT і ONU. Рисунок 2.17 ілюструє логічну схему процесу DBA. Завдяки високій доступній смузі пропускання в XG-PON розподіл смуги базується на угодах про рівень обслуговування (SLA), де якість обслуговування (QoS) може надаватися відповідно до вимог. Смуга пропускання розподіляється за контейнером передачі (T-CONT), який є основним блоком керування розподілом смуги пропускання. Кожен T-CONT індексується Alloc-ID. T-CONT представляють собою логічний зв'язок між OLT і ONU, причому кожному ONU можна призначити один або більше T-CONT. Існує три різних типи T-CONT, можливих для динамічного розподілу смуги пропускання, T-CONT типів 2, 3 і 4. T-CONT типу 2 призначений для трафіку типу "вмикання-вимкнення" з чітко визначеною межею швидкості та суворими вимогами до затримки з гарантованою пропускнуою здатністю. Ця пропускна здатність має бути надана трафіку T-CONT, якщо запитується. Якщо пропускна здатність не використовується, її можна розподілити для інших T-CONT, за умови, що вона буде доступна, як тільки це буде потрібно для T-CONT типу 2. T-CONT типу 3 надається гарантована пропускна здатність, і йому також може бути надана негарантована пропускна здатність, якщо використовується вся гарантована пропускна здатність. Він підходить для змінної швидкості, бурхливого трафіку з вимогами гарантії середньої швидкості. T-CONT типу 4 не

має гарантії пропускну здатності, але він має право на найкращий спільний доступ до пропускну здатності.

У XG-PON DBA дотримується суворої ієрархії пріоритетів серед форм призначеної смуги пропускання: 1) Фіксована смуга пропускання (найвищий пріоритет); 2) Гарантована смуга пропускання; 3) Негарантована смуга пропускання; 4) Максимальна смуга пропускання (найнижчий пріоритет).

По-перше, OLT призначає вихідну пропускну здатність фіксованій пропускну здатності кожного Alloc-ID. По-друге, OLT виділяє гарантовану смугу пропускання для кожного Alloc-ID, якщо Alloc-ID має достатньо трафіку для використання гарантованого. Потім OLT задовольняє вимоги щодо негарантованої пропускну здатності для відповідних ненасичених ідентифікаторів AllocID, доки всі вони не досягнуть свого рівня насичення або пул надлишкової пропускну здатності не вичерпається. Нарешті, OLT розподіляє смугу пропускання, що залишилася, для компонентів смуги пропускання з найкращим зусиллям.

Оскільки XG-PON приймає цю сувору ієрархію у розподілі пропускну здатності, отриманий QoS запиту визначається типом T-CONT, який відображає цей запит. Відображення повинно враховувати не тільки вимоги QoS програми, але й характеристики трафіку. Наприклад, такі програми, як потоки HDTV або відеоконференції для бізнес-абонентів (які готові витратити більше, щоб отримати гарантований QoS), потенційно відображаються в T-CONT типу 1 [17].

Таблиця 2.3 – Фізичні параметри простого ODN (ODS) [22]

ODN	Од. вим	Технічні характеристики
Тип волокна	–	[ITU-T G.652] або сумісний
Діапазон згасання	дБ	Клас N1: 14 – 29 Клас N2: 16 – 31 Клас E1: 18 – 33 Клас E2: 20 – 35
Максимальна відстань по оптоволокну між точками S/R та R/S	км	DD20: 20 DD40: 40
Мінімальна відстань по оптоволокну між точками S/R та R/S	км	0
Двонаправлена передача	–	1-волоконний WDM

Таблиця 2.4 – Параметри оптичного інтерфейсу 9,95328 Гбіт/с у низхідному напрямку [22]

інтерфейс 9,95328 Гбіт/с	Од. вим	Цінність			
Передавач OLT (оптичний інтерфейс Old)					
Номінальна швидкість лінії	Гбіт/с	9,95328			
Робоча довжина хвилі	нм	1575 - 1580 p.p.			
Код лінії	-	NRZ			
Максимальний коефіцієнт відображення при S/R, виміряний на довжині хвилі передавача	дБ	немає даних			
Мінімальний ORL ODN на ОЛуї Олд (Примітки 2 та 3)	дБ	більше 32			
Клас ODN		N1	N2	E1	E2

Продовження таблиці 2.4

			N2a	N2b		E2a	E2b
Середня запущена потужність MIN	дБм	+ 2,0	+ 4,0	+ 10,5	+6	+8	+ 14,5
Середня потужність МАКС.	дБм	+ 6,0	+ 8,0	+ 12,5	+ 10	+ 12	+ 16,5
Запущена оптична потужність без введення в передавач	дБм	немає даних					
Мінімальний коефіцієнт вимирання	дБ	8.2					
Допуск передавача по відбитій оптичній потужності	дБ	більше -15					
Діапазон розсіювання	пс/нм	0-400 (DD20) 0-800 (DD40)					
Мінімальний коефіцієнт придушення бічної моди	дБ	30					
Максимальні диференціальні втрати на оптичному шляху	дБ	15					
Приймач ONU (оптичний інтерфейс Орд)							
Максимальне погіршення оптичного шляху	дБ	1,0 1,0(DD20) 2,0 (DD40)					
Максимальний коефіцієнт відбиття при R/S, виміряний на довжині хвилі приймача	дБ	менше -20					
Опорний рівень коефіцієнта бітових помилок	-	10-3					
Клас ODN		N1	N2		E1	E2	
			N2a	N2b		E2a	E2b

Продовження таблиці 2.4

Мінімальна чутливість при еталонному рівні BER	дБм	- 28,0	- 28,0	- 21,5	- 28,0	- 28,0	- 21,5
Мінімальне навантаження при еталонному рівні BER	дБм	- 8,0	- 8,0	- 3,5	- 8,0	- 8,0	- 3,5
<p>ПРИМІТКА – Для гілок ODN з максимальною довжиною волокна OLT-ONU понад 20 км максимальним значенням OPP є значення DD40. Однак втрати у волокні на довжині хвилі низхідного потоку нижче, ніж на довжині хвилі висхідного потоку, і це більш ніж компенсує додатковий OPP DD40 порівняно з DD40.</p> <p>DD20 (тобто, втрати на довжинах хвиль у висхідному напрямку обмежують відстань зв'язку, і, отже, існує запас втрат для низхідний сигнал). Для систем, які підключають ONU як на короткі, так і великі відстані (до 40 км) до одного і того ж порту OLT, оптичний канал повинен відповідати максимальному значенню OPP DD20 для ONU при ≤ 20 км і максимальному значенню OPP DD40 для ONU при > 20 км.</p>							

Таблиця 2.5 Параметри оптичного інтерфейсу висхідного напрямку 2,48832 Гбіт/с [22]

інтерфейсу висхідного напрямку 2,48832 Гбіт/с	Од. ізм	Цінність			
Передавач ONU (оптичний інтерфейс ORU)					
Номінальна швидкість лінії	Гбіт/с	2.48832			
Робоча довжина хвилі	нм	1260 – 1280			
Код лінії	-	NRZ			
Максимальний коефіцієнт відображення при R/S, виміряний на довжині хвилі передавача	дБ	менше -6			
Мінімальний ORL ODN на ORU і Орд	дБ	більше 32			
Клас ODN		N1	N2	E1	E2

Продовження таблиці 2.5

Середня запущена потужність MIN	дБм	+ 2,0	+ 2,0	+ 2,0	+ 2,0
Середня потужність МАКС.	дБм	+ 7,0	+ 7,0	+ 7,0	+ 7,0
Запущена оптична потужність без введення в передавач	дБм	менше, ніж "Мінімальна чутливість при BER референтний рівень» – 10			
Максимальна роздільна здатність Tx	біти	32			
Максимальне вимкнення Tx	біти	32			
Мінімальний коефіцієнт вимирання	дБ	8.2			
Допуск передавача по відбитій оптичній потужності	дБ	більше -15			
Діапазон розсіювання	пс/нм	від 0 до -140 (DD20) від 0 до -280 (DD40)			
Мінімальний коефіцієнт придушення бічної моди	дБ	30			
Приймач OLT (оптичний інтерфейс Olu)					
Максимальний штраф за оптичний тракт	дБ	0,5			
Максимальний коефіцієнт відбиття при S/R, виміряний на довжині хвилі приймача	дБ	менше -20			
Опорний рівень коефіцієнта бітових помилок	-	10^{-4}			
Клас ODN		N1	N2	E1	E2
Мінімальна чутливість при еталонному рівні BER	дБм	- 27,5	- 29,5	- 31,5	- 33,5
Мінімальне навантаження при еталонному рівні BER	дБм	- 7,0	- 9,0	- 11	- 13

Тип джерела: Враховуючи характеристики згасання/дисперсії цільового оптоволоконного каналу, можливі пристрої передачі включають тільки лазери з

однією поздовжньою модою (SLM). Вказівка номінального типу джерела в цій Рекомендації не є обов'язковою вимогою, хоча також очікується, що тільки лазери SLM задовольняють усім вимогам до відстані та лінійної швидкості систем XG-PON як для низхідного, так і для висхідного каналів. Використання лазерів з багатопоздовжньою модою (MLM) не розглядається через їх практичні обмеження на відстані/лінійній швидкості [22].

Спектральні характеристики: Для SLM-лазер лазер визначається як діапазон дисперсії його волокна, діапазон, в якому характеристики лазера і дисперсія волокна призводять до певного погіршення на заданій відстані по волокну за стандартних умов експлуатації. Крім того, для контролю шуму поділу мод у системах SLM вказується мінімальне значення коефіцієнта придушення бічної моди лазера. Фактичні спектральні характеристики обмежені максимальною кількістю втрат оптичного тракту (OPP), що виникають за найгіршої оптичної дисперсії в каналі даних.

Середня запущена потужність: Середня запущена потужність при Олді ORU - середня потужність псевдовипадкової послідовності даних, що передається передавачем у волокно. Він вказаний у вигляді діапазону, щоб забезпечити певну оптимізацію витрат. У робочому стані нижня цифра є мінімальною потужністю, яка має бути забезпечена, а вища — це потужність, яку ніколи не можна перевищувати. Вимірювання запущеної потужності в ORU оптичний інтерфейс повинен враховувати імпульсний характер висхідного трафіку, що передається ONU [22].

Запущена оптична потужність без введення в передавач: У висхідному напрямку передавач ONU в ідеалі не повинен подавати потужність у волокно у всіх пакетах, які не призначені для цього ONU. Однак рівень оптичної потужності, менший або рівний запущеній потужності без введення в передавач, допускається під час пакетів, які не призначені для цього ONU. Протягом періоду біта Tx Enable, безпосередньо попереднього призначеному пакету, який може використовуватися для попереднього зміщення лазера, і протягом періоду біта Tx Disable, безпосередньо наступного за призначеним пакетом, максимально

допустимий рівень потужності, що запускається, дорівнює нульовому рівню, відповідному коефіцієнту ослаблення [22].

2.4 Висновки до розділу 2

Підсумовуючи, можна зазначити що пасивні оптичні мережі (PON) відіграють важливу роль у розвитку мереж Fiber to the Home (FTTH). PON вважається однією з найуспішніших архітектур доступу, яка може забезпечити високу пропускну здатність та великий радіус дії. З аналізу видно, що при однакових швидкостях передачі даних продуктивність односпрямованої WDM PON з 2 користувачами краще з високою добротністю та низьким BER порівняно з односпрямованою системою TDM PON. З графіків видно, що зі збільшенням довжини волокна добротність зменшується, а BER збільшується. Оскільки технологія покращилася від TDM до WDM, WDM PON якість сигналу і відстань, що покривається переданим сигналом, були збільшені, а кількість помилок в отриманому сигналі зменшилася в порівнянні з TDM PON. система.

Також останнім часом впроваджуються різні архітектури WDM PON, що збільшує можливості використання методів модуляції через значні покращення в системі, що досягають можливостей передачі даних. Технологія WDM PON безперервно розвивається, її економічна ефективність зростає. Ключовими компонентами такої мережі є широкосмугові лазери ONU і мультиплексори/демультиплексори AWG (Arrayed waveguide grating) на основі масивів планарних хвилеводів.

Як стверджувалося раніше, 10-гігабітний PON (XG-PON) — це новий стандарт що випущений FSAN, він покращує GPON у багатьох аспектах. Наприклад, зміни швидкості передачі даних за умовчанням до 10 Гбіт/с і збільшення швидкості передачі даних до 2,5 або 10 Гбіт/с; мінімальний логічний розподіл збільшено до 256 (з 64 у GPON), а фізичний охоплення розширено до 60 км. На сьогодні для нас є досить важливим вивчити проблеми з продуктивністю,

що виникають із розгортанням XG-PON оскільки він може прокласти шлях для багатьох додатків із інтенсивним використанням пропускної здатності.

3 ПЕРЕВАГИ ТЕХНОЛОГІЙ WDM-PON ТА XG-PON ПРИ ПОБУДОВІ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

3.1 Характеристики WDM-PON та XG-PON та їх порівняння

Стандарти GPON для пасивної гігабітної оптичної мережі. Це тип мережі доступу точки-багатоточки. Його основна особливість полягає у використанні пасивних розгалужувачів в оптоволоконній розподільній мережі, що дозволяє використовувати одне волокно, що підводить, з центрального офісу постачальника для обслуговування декількох будинків і малих підприємств.

WDM-PON – це технологія мережі доступу, яка може значно змінити інфраструктуру операторів зв'язку. WDM-PON створює логічну архітектуру точки-точки на основі довжини хвилі на основі фізичної волоконно-оптичної топології точки-багатоточки. Він використовує технологію WDM мультиплексування/демультиплексування, щоб гарантувати, що сигнали даних можуть бути поділені на окремі вихідні сигнали, які підключаються до будинків або будинків. Такий поділ трафіку на основі апаратних засобів надає клієнтам переваги безпечного та масштабованого лінії зв'язку точка-точка по довжині хвилі, але дозволяє оператору підтримувати дуже невелику кількість волокон, що значно знижує експлуатаційні витрати. Для сьогоденної мережі WDM-PON також є важливою технологією під час побудови мережі 5G [16].

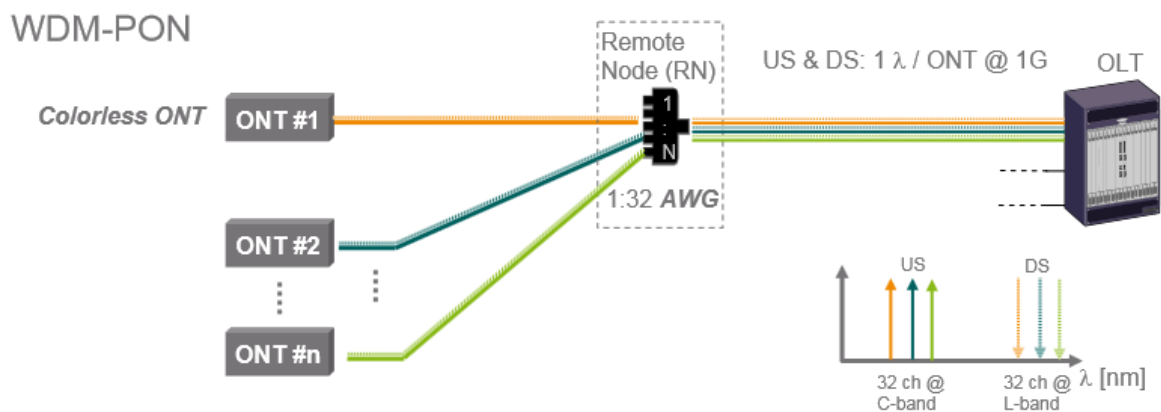


Рисунок 3.1 – Технологія WDM-PON

XG-PON, відомий як 10G-PON, є вдосконаленням GPON, яке визначає механізм міграції для отримання сигналу для користувача 10 Гбіт і користувача 2,5 Гбіт. Східний сигнал користувача XGPON визначається в діапазоні від 1575 до 1580 нм, а висхідний сигнал користувача - від 1260 до 1280 нм. 10G-PON має аналогічну архітектуру точки-багатоточки (P2MP) GPON і може підтримувати різні сценарії доступу, такі як fiber to the home (FTTH), fiber to the building (FTTCell), fiber to the building (FTTB), fiber to the curb (FTTCurb), і fiber to cabinet (FTTCabinet).

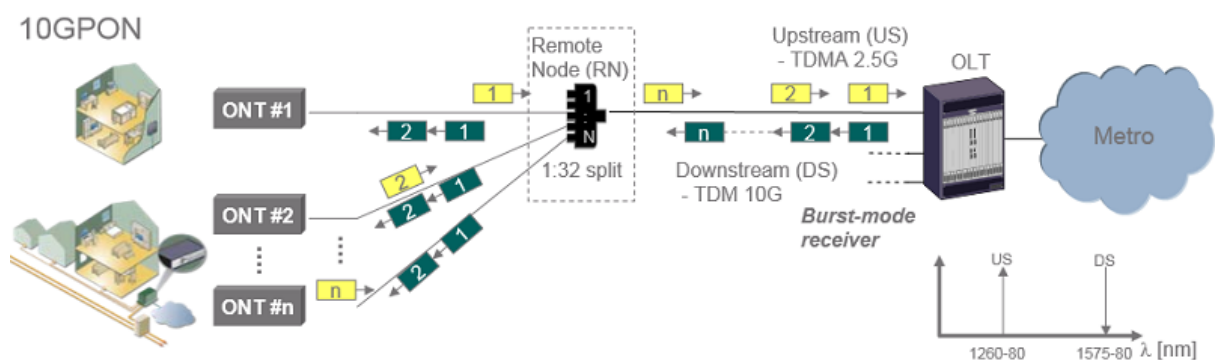


Рисунок 3.2 – Технологія XG-PON

Таблиця 3.1 – Підсумок технічних характеристик GPON, 10G-PON та WDM-PON

	GPON	XG-PON	WDM-PON
Висхідний потік (nm)	1260-1360	1260-1280	Багато
Низхідний потік (nm)	1480-1500	1575-1580	Багато
Швидкість висхідної лінії	1.2Gbps	2.5/10Gbps	1Gbps
Швидкість низхідної лінії	2.5Gbps	10Gbps	1Gbps
Співіснування GPON	/	Да	Да

GPON та XG-PON: Щоб покращити швидкість передачі та продовжувати використовувати існуючу оптоволоконну систему для зниження витрат, XG-PON було введено для реалізації таких вимог. XG-PON має структуру мережі, аналогічну GPON, з різними довжинами хвиль висхідного та низхідного потоків,

але вони можуть співіснувати один з одним, щоб захистити інвестиції мережевих операторів.

GPON та WDM-PON: Відмінності між GPON та WDM-PON в основному полягають у пропускній здатності та використанні волокна. Ємність WDM-PON на користувача легко оцінити - кожному кінцевому користувачеві виділяється лише одна довжина хвилі. Як правило, сигнал GbE передається на кожній довжині хвилі, надаючи кожному кінцевому користувачу пропускну здатність всього 1,25 Гбіт/с. Варто зазначити, що WDM-PON не має особливих переваг, якщо область сигналу становить чисте мовлення (наприклад, звичайне IP-телебачення): ширококомовному сигналу необхідно реплікувати через OLT на кожній довжині хвилі та незалежно надсилати кожному користувачеві. Оцінка пропускної здатності GPON для кожного користувача не така проста, оскільки вона значною мірою залежить від пакету послуг, що надаються користувачам, і необхідно враховувати багато елементів.

Оскільки у випадку GPON використовується двонаправлена передача, тоді як у нашому прикладі WDM-PON використовується односпрямована передача, волоконна інфраструктура явно краще використовується через GPON. Однонаправлена передача може використовуватися WDM-PON, але це вимагає витрат [16].

Бюджет оптичного каналу – велика різниця між WDM-PON та XG-PON. Схема передачі WDM-PON досить проста: загасання визначається втратою MUX/DeMUX та розповсюдженням волокна (з урахуванням роз'ємів, патч-панелей, а також інших елементів втрати сигналу, які можуть бути присутніми в інфраструктурі доступу). Візьміть CWDM-PON як приклад, стандартні модулі CWDM можуть гарантувати потужність, що передається 0 дБм, в той час як чутливість приймача залежить від використовуваного детектора. При використанні PIN-коду чутливість на 1,25 Гбіт/с (за умови, що передається GbE) може бути близько -18 дБм.

У той час як для XG-PON, стандартизація наказує XG-PON1, який визначає XG-PON, бюджет лінії зв'язку достатній для доступу до GPON B+ та GPON C.

Беручи до уваги дещо вищі втрати, випробувані довжинами хвиль XG-PON1 у порівнянні з довжиною хвилі GPON, а також ряд інших відмінностей у лінії передачі між GPON та XG-PON, бюджет 29 та 31 дБ залежно від порівняння з GPON B+ або GPON C.

Крім того, на стороні OLT, використовуючи поділений порт OLT, XG-PON має переваги щодо енергоспоживання порівняно з WDM-PON, який потребує одного виділеного порту OLT на кожного абонента. Однак, оскільки WDM-PON зазвичай має нижчий бюджет потужності (через набагато менші втрати в розгалужувачі), споживана потужність на передавач може бути нижчою, ніж у XG-PON. А інтеграція (масиви Tx, Rx), а також порти OLT, що не використовуються, які можуть відключити і допомогти WDM-PON заощадити електроенергію. На боці ONT (основна область енергоспоживання), XG-PON виграє від відсутності необхідності в лазерах, що охолоджуються, в той час як WDM-PON може використовувати компоненти з більш низькою швидкістю і меншим бюджетом потужності [16].

XGS-PON — це оновлений стандарт для пасивних оптичних мереж (PON), який підтримує симетричну передачу даних зі швидкістю 10 Гбіт/с і є частиною сімейства стандартів, відомих як Gigabit-capable PON або G-PON. G-PON означає Gigabit PON або 1 Gigabit PON. «X» у XGS означає число 10, а літера «S» означає симетричний, XGS-PON = 10 Gigabit Symmetrical PON. Попередня несиметрична 10-гігабітна версія PON (XG-PON) була обмежена 2,5 Гбіт/с у висхідному напрямку.

Технологія PON виникла в 1990-х роках і продовжувала розвиватися через численні ітерації з різними довжинами хвиль, швидкостями та компонентами, що з'являлися в міру вдосконалення технології. Загальним знаменником усіх волоконно-оптичних мереж PON залишається відсутність живлення або пасивний стан волокна та його компонентів, що розділяють або об'єднують, тобто в мережі немає активних елементів, таких як оптичні підсилювачі, які вимагали б живлення. Оскільки потокове передавання, висока

чіткість, 5G та інші нові технології постійно підвищують вимоги до пропускної здатності, розробка XGS-PON та інших стандартів виявилася важливою [24].

Одночасна передача вгору та вниз по одному волокну стає можливою завдяки мультиплексуванню за довжиною хвилі (WDM). Ця технологія дозволяє використовувати одну довжину хвилі XGS-PON або колір передачі світла для висхідного потоку та інший для низхідного потоку.

Стандарт XGS-PON : стандартизоване розгортання та робота PON була виконана з моменту першого прийняття через стандарти Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) для сімейства G-PON та через стандарти Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) для Ethernet PON або «EPON». Новий стандарт XGS-PON був випущений у 2016 році та позначений як Рекомендація ITU-T G.9807.1.

Обсяг нового стандарту визначає XGS-PON як 10-гігабітну симетричну пасивну оптичну мережу доступу для житлових, корпоративних, мобільних транспортних мереж та інших додатків. Для створення комплексного стандарту для цієї симетричної 10-Гбіт/с еволюції G-PON були використані елементи попереднього стандарту фізичного рівня XG-PON, тобто ті самі компоненти оптичного трансивера можна використовувати як для XG, так і для XGS-PON. Стандарти рівня протоколу також були використані для стандарту NG-PON2, ITU-T G.989.3 [24].

Довжини хвиль XGS PON: незважаючи на те, що умови щодо фізичного волокна та форматування даних для технології XGS-PON залишаються незмінними порівняно з оригінальним стандартом G-PON, довжини хвиль змінилися. XGS-PON працює на довжині хвилі нижнього потоку 1577 нм і довжині хвилі висхідного потоку 1270 нм. Основна причина цього полягає в тому, щоб дозволити багатьом службам PON співіснувати на одній PON і забезпечити безперебійне оновлення/міграцію послуг або дозволити різним постачальникам послуг використовувати той самий PON або пропонувати різні рівні обслуговування (наприклад, для бізнесу та для приватних клієнтів). Довжини хвиль для XGS-PON відрізняються від інших стандартів, таких як G-

PON і NG-PON2, хоча загальне вікно передачі PON від 1260 до 1650 нм здатне вмістити стандарти G-PON, XGS-PON і NG-PON2 над тим самим оптоволоконної мережі одночасно. Оскільки XGS-PON був оновленням стандарту XG-PON для забезпечення симетричної пропускної здатності, XG і XGS-PON працюють на однакових довжинах хвиль вгорі та внизу, це єдиний випадок повторного використання однакових довжин хвиль. Сьогодні більшість операторів, які хочуть розгорнути послуги 10G, обирають XGS-PON [24].

3.2 Сценарії розгортання наступного покоління PON

За даними Nokia деякі типові сценарії розгортання наступного покоління PON від GPON до XGS-PON такі: перший є опортуністичним, застосовуючи NG-PON у малих обсягах і низькій щільності, зазвичай забезпечуючи дуже високі швидкості розрізненим бізнесам або клієнтам високого класу. Другий сценарій — це розгортання в гарячих зонах: велика кількість з'єднань NG-PON у певному районі, як це можна очікувати в заможному житловому районі чи бізнес-парках. Третій підхід – це масове розгортання, коли постачальник послуг готовий розширюватися за допомогою NG-PON.

Кожен сценарій має однакові проблеми: вартість, час виходу на ринок і безперервність обслуговування. Поточний метод міграції – це модульний підхід із використанням зовнішніх елементів співіснування. Це найкраще для невеликих міграцій, оскільки оператори можуть швидко переміщатися з невеликими початковими інвестиціями. Однак це може стати громіздким, оскільки додаткове обладнання швидко накопичується, що потребує додаткової роботи з перепрокладання кабелів, більшої кількості відвідувань центрального офісу та вищих OPEX для зберігання, експлуатації та обслуговування обладнання. Для масових розгортань модульний підхід стає великою проблемою [25].

Nokia має повний набір рішень для будь-якого сценарію міграції та робить ефективним як поступове, так і широкомасштабне розгортання NG-PON. Нова лінійна карта Multi-PON підтримує три режими роботи на кожному порту: режим

GPON, режим XGS-PON або режим multi-PON, що підтримує GPON і XGS-PON одночасно з вбудованою функцією співіснування, тому немає потреби в зовнішньому обладнанні для спільного існування. Аналіз показує, що для масового переходу на NG-PON цей підхід на 20% дешевший і може скоротити роботу з міграції в 10 разів.

Multi-PON може миттєво підготувати вашу мережу до XGS-PON, замінивши карти GPON на карти Multi-PON, оснащені оптикою Multi-PON. Існуючі користувачі GPON підтримують свої послуги GPON, а коли приходить час оновити, це робиться віддалено через OSS, не потребуючи додаткової ручної роботи, повторного підключення кабелів, нових карт чи іншого обладнання. Оновлення стосується лише тих користувачів, яких потрібно перенести; решта можуть залишатися на GPON, навіть якщо вони спільно використовують той самий PON. Це дуже ефективно для тих операторів, які планують міграцію дуже скоро [25].

Для середньострокових і довгострокових міграцій Multi-PON забезпечує плату за зростанням. По-перше, карти GPON можна замінити картами Multi-PON і застарілою оптикою GPON, щоб контролювати витрати. Оператори можуть продовжувати використовувати послуги GPON, і, коли потрібне оновлення, оптика GPON замінюється на оптику Multi-PON, а користувачі переходять на XGS-PON.

Для нових розгортань, де оператори відразу переходять до XGS-PON, Multi-PON пропонує рішення високої щільності та великої ємності. Оператори можуть розглянути оптику XGS-PON, яка економічно ефективніша, оскільки не потрібна співіснування. Або вони можуть використовувати оптику Multi-PON, щоб отримати максимальну гнучкість і запропонувати правильну послугу за правильною ціною [25].

Multi-PON означає, що постачальники послуг можуть швидко вийти на ринок з новими послугами, тримати витрати під контролем і звести перебої в роботі до мінімуму. Nokia Multi-PON побудовано на нашому новому чіпсеті під назвою Quillion, який ми розробили власними силами, щоб забезпечити високу

щільність (16 портів), високу продуктивність (200 Гбіт/с, неблокуюча об'єднана плата) і низьке енергоспоживання (до 50 %). Ми вжили заходів, щоб зробити наше рішення ще ефективнішим, реалізувавши робочі процеси на основі намірів, які автоматизують процес міграції у вузлі доступу та системі керування, який може бути викликаний такою подією, як заміна ONT вдома у клієнта [25].

3.3 Обладнання нокія для пасивних оптичних мереж та його застосування

Компанія Nokia розробила рішення яке надає операторам здійснювати міграцію у власному темпі. Multi-PON — це рішення, яке надає постачальникам послуг ще більший контроль над своїми стратегіями широкопasmового зв'язку, фактично спрощуючи це.

Для середньострокових і довгострокових міграцій Multi-PON забезпечує плату за зростанням. По-перше, карти GPON можна замінити картами Multi-PON і застарілою оптикою GPON, щоб контролювати витрати. Оператори можуть продовжувати використовувати послуги GPON, а якщо буде потрібно оновлення, оптику GPON замінити на Multi-PON [26].

Як приклад було створено мережу доступу для ветеринарної лікарні де KPN продемонструвала швидкість широкопasmового зв'язку 20 Гбіт/с під час польових випробувань із клінікою для тварин Caresse у Роттердамі. Високошвидкісне підключення стає все більш важливим у ветеринарії, де зображення високої роздільної здатності мають бути доступні в хмарі. Симетричні швидкості 20 Гбіт/с дозволили б завантажувати (або завантажувати) майже 100 сканованих файлів по 30 МБ кожен за одну секунду.

KPN розгорнула найсучаснішу технологію 25G PON від Nokia під час польових випробувань, використовуючи наявну оптоволоконну мережу. Використовуючи мікросхему Quillon від Nokia, 25G PON може працювати разом із GPON і XGS-PON на одному оптоволоконні та працювати від того самого вузла доступу [26].

Зазвичай вузли доступу Nokia з високою пропускнуою спроможністю розташовані в центральних офісах телекомунікацій і розгортаються для широкомасштабного розгортання оптоволокна. Вони з'єднують тисячі користувачів через оптоволокно, об'єднують їхній ширококутний трафік і надсилають його глибше в мережу. Оптоволоконні вузли доступу можуть підтримувати кілька оптоволоконних технологій, включаючи GPON, XGS-PON, 25G PON і Point-to-Point Ethernet, щоб надавати широкий спектр послуг із найкращою технологією.

Пристрої Nokia ONT (Optical Network Termination) або оптоволоконні модеми розташовуються на місці користувача. Вони завершують оптичне волоконне з'єднання та надають ширококутні послуги в приміщеннях користувачів або на сотових сайтах.

Оператори ширококутної зв'язку в усьому світі перемикають передачу та розгортають PON наступного покоління у своїх оптоволоконних мережах оскільки NG-PON це більше, ніж швидкість - це про можливість. А саме можливість об'єднати ширококутний зв'язок у житлових приміщеннях, для бізнесу та будь-який мобільний зв'язок в одній інфраструктурі. Прискорити розгортання 5G і заощадити 50% на витратах на мобільний транспорт. Створити нові джерела доходу та підвищити рентабельність інвестицій. Надають клієнтам преміальні гігабітні та мультигігабітні послуги [26].

8 жовтня 2020 р провідні оператори та постачальники комунікаційних технологій підписують багатоджерельну угоду 25GS-PON, щоб прискорити розвиток симетричного PON 25G. Промислова група об'єднує основних операторів і постачальників для визначення та просування технології наступного покоління 25GS-PON для підтримки нових 5G і промислових потреб. Угода про багато джерел multi-source agreement (MSA) 25GS-PON підкреслює важливість і терміновість мати 25GS-PON, щоб скоротити розрив між 10G і 50G PON. Так як 25GS-PON надає постачальникам послуг зв'язку найбільш економічно ефективні та своєчасний шлях еволюції для технології волокна PON [27].

Десять основних операторів і постачальників галузі зв'язку нещодавно оголосили про підписання угоди 25G symmetric PON із багатьма джерелами (25GS-PON MSA) з метою просування та прискорення розвитку 25GS-PON. Група MSA визначила специфікацію 25GS-PON, необхідну для усунення розриву між 10G XGS-PON і 50G PON в ITU-T. MSA було створено після того, як група ITU-T SG15/Q2 не досягла консенсусу щодо стандартизації 25GS-PON, яка вважається важливою технологією багатьма провідними світовими операторами та постачальниками.

Формування 25GS-PON MSA Group підкреслює важливість 25GS-PON для галузі, оскільки вона шукає економічно ефективний і своєчасний шлях оновлення мережі, який може задовольнити потреби ери мобільного 5G і великих підприємств, де симетричні з'єднання стають все більш важливим. Як перший крок, 25GS-PON MSA Group створила специфікацію для 25GS-PON, яка включає оптичні характеристики на основі стандарту IEEE 802.3ca 25G EPON, а також рівень конвергенції передачі (TC), який є розширенням XGS-PON. Група MSA також сприятиме розвитку ринку для 25GS-PON [27].

Джулі Кунстлер, головний аналітик Omdia, сказала: «25-гігабітний симетричний PON є важливим наступним кроком і природною еволюцією оптоволоконних мереж, особливо тому, що він використовує існуючі технології. Численні оператори зацікавлені в 25GS-PON для використання в транспорті 5G, а також у корпоративних і бізнес-послугах. Створення MSA для виведення цієї технології на ринок демонструє інновації, лідерство та орієнтовану на клієнта ринкову обізнаність з боку його членів».

Члени-засновники групи 25GS-PON MSA включають: AOI, Chorus, Chunghwa Telecom, Ciena, MACOM, MaxLinear, NBN Co., Nokia, Sumitomo Electric Industries, Ltd і Tibit Communications [27].

3.4 Оптичний лінійний термінал ZTE ZXА10 С300

Оптичний лінійний термінал ZXА10 С300 - перспективна і одна з найпотужніших платформ оптичного доступу, розроблена для масового розгортання оптичного доступу і економії коштів. Її потужні функції і висока продуктивність роблять масове розгортання FTTx простіше, ніж коли-небудь раніше. Цей пристрій надає повний сервіс оптичного доступу конвергентної платформи, забезпечуючи QoS операторського класу і надійність мережі для задоволення вимог для реалізації FTTx послуг [28].

Особливості:

- Уніфікована платформа для GPON, EPON та P2P.
- Більша ємність та висока щільність: відповідають потребам операторів для масового розгортання оптичного доступу.
- Підтримка новітніх технологій NG-PON, наприклад 10G EPON, 10G GPON, WDM PON та LR PON.
- Широкі можливості підтримки послуг: IPTV, VoIP, HSI, VPN, мобільні транспортні мережі і т.д.
- Розширені функції багатоадресної розсилки сприяють масовому впровадженню IPTV.
- Високий рівень безпеки: автентифікація ONT, ідентифікація користувача, ізоляція порта, прив'язка адреси, фільтрація пакетів та обмеження ширококомовних пакетів.
- Диференціація послуг: комплексні механізми QoS для голосових, відео та високошвидкісних інтернет-послуг.
- Гнучкі мережеві топології: різні інтерфейси висхідних ліній зв'язку та допоміжних інтерфейсів.
- Висока надійність: резервування ключових частин; підтримка захисту типів B та C для низхідної лінії PON; LACP/STP/RSTP/MSTP для висхідної лінії [28].

Таблиця 3.2 – Характеристики плат [28]

Карти керування	SCXN - карта керування та комутації, комутаційна спроможність 480G
	SCXL - карта керування та комутації, комутаційна спроможність 960G
	SCTM - карта керування та комутації, комутаційна спроможність 2,56T
Сервісні карти	GTGO/GTGH - 8/16*GPON лінійна карта
	ETGO/ETGH - 8/16*EPON лінійна карта
	GTXO - 8*XG-PON1 лінійна карта
	FTGK - 48*P2P / 24*GE/FE Ethernet
Карти живлення	PRWG - 1*48V + 2*RG45 карта живлення
Uplink карти	GUFQ - 4*GE/FE optical Ethernet
	GUSQ - 2*GE optical + 2*GE/FE RG-45
	XUTQ - 4*10GE optical Ethernet
	HUTQ - 2*10GE + 2*GE optical Ethernet
	HUVQ - 2*10GE/GE + 2*GE/FE optical Ethernet (Sync-E)

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики [28]

Характеристики шасі	<p>Пропускна здатність задньої плати: 2,8 Тбіт/с Комутаційна здатність: 800 Гбіт/с Всього 21 слот 14 слотів для універсальних лінійних карт 2 слоти для комутаторів і плат керування 2 слота для карт живлення 2 слоти для каскадних інтерфейсів 1 слот для карти моніторингу середовища</p>
Щільність картки абонента	<p>Картка GPON: 4/8 портів на карту Картка EPON: 4/8 портів на картку Картка P2P: 8/16 портів на карту Картка 10G EPON: 2 порти на картку</p>
Інтерфейсна карта Uplink	<p>4*10GE uplink на картку 4*GE uplink на картку 1*STM-4/OC12 або 2*STM-1/OC3 TDM uplink на картку 32* E1/T1 висхідна карта (збалансована та незбалансована)</p>

Продовження таблиці 3.3

Особливості PON	<p>EPON-сумісний з IEEE 802.3ah GPON-сумісний з ITU G.984.x 10GEPON сумісний з IEEE 802.3v</p> <p>Підтримка коефіцієнта оптичного розділення до 1:128 для GPON, коефіцієнта оптичного розділення 1:64 для EPON і коефіцієнта оптичного розділення 1:256 для 10GEPON</p> <p>Підтримка OLS (оптичний лазерний контроль) Фізична дальність: 20~60 км</p> <p>Високоєфективний DBA: NSR-DBA, SR-DBA 1PPS+TOD, IEEE 1588V2</p> <p>Потужність трансивера: клас B+ або клас C+ Захист оптичного каналу типу B і C</p> <p>FEC AES128 SCB</p>
Функції L2/L3	<p>4K VLAN 1:1/N:1 VLAN</p> <p>802.1ad, SVLAN, Selective QinQ, стекування VLAN</p> <p>Глибина таблиці MAC-адрес 32 Кб з можливістю розширення до 256 Кб</p> <p>Переадресація на швидкості лінії STP/RSTP/MSTP сумісний з IEEE 802.1d / 802.1w / 802.1s</p> <p>Агрегація каналів IEEE 802.3ad DHCP сервер, DHCP Relay (опція 60/82), DHCP проксі</p>
Маршрутизація L3	<p>Статистична маршрутизація RIP V1/V2, OSPF v2, IS-IS, BGP</p> <p>Багатоадресна маршрутизація: PIM-SM, PIM-DM</p>
Групова розсилка	<p>1K Multicast групи IGMP V1/2/3, IGMP Snooping і проксі (v1/v2/v3) MVLAN: багатоадресна VLAN</p> <p>Контроль доступу до каналу (CAC), попередній перегляд (PRV) і детальний запис виклику (CDR) для IPTV</p> <p>Затримка перемикавання каналу менше 50 мс</p>
QoS	<p>8 черг на порт</p> <p>Механізм черги та планування: SP, DWRR, SP+DWRR IPv4 DSCP Diffserv</p> <p>Класифікація потоків, обмеження швидкості, формування та встановлення пріоритетів</p> <p>Статистика трафіку WRED і потрібний колір SLA: CIR, PIR, EIR, MBS</p>

Продовження таблиці 3.3

Безпека	L2-L4 ACL Аутифікація абонента IEEE 802.1x Захист джерела IP та MAC Стійкість до атак DOS Захист від підробки MAC/IP (прив'язування MAC, прив'язування IP, відстеження DHCP) Антифлуд: придушення ширококомовних пакетів, придушення пакетів IGMP, придушення пакетів DHCP Обмеження кількості MAC-адрес на основі VLAN або GEM-порту Віддзеркалення портів Ідентифікація порту користувача, наприклад PPPOE+ і DHCP, опція 82
O&M	Безпека оператора, мультипривілейований оператор, SSH v1/v2, FTP/TFTP, ACL Протокол управління та інтерфейс: CLI, Telnet, SNMP V1/V2C/V3, MIBII Віддалене завантаження та оновлення прошивки Моніторинг, контроль і сигналізація навколишнього середовища
Навколишнє середовище	Робоча температура: -5 °C ~ +45 °C Робоча вологість: 5% ~ 95%, без конденсації
Блок живлення	Робоча напруга: -48 В (±20%) або 220 В змінного струму (±20%, 50 Гц)
Споживання енергії	GPON: 1250W EPON: 680W
Розміри	443.7mm (H) X 482.6mm (W) X 270mm (D)

Вузли доступу високої місткості для широкомасштабного розгортання оптоволокна - серія високопродуктивних вузлів доступу Nokia Lightspan FX. Вони забезпечують безкомпромісну продуктивність і можливість програмування SDN, щоб забезпечити найкращий гігабітний досвід для домашніх, мобільних і бізнес-користувачів. Їхня неперевершена гнучкість у розвитку мережі відповідає вимогам сьогодення та завтрашнього дня [23].

Серія Nokia Lightspan FX підтримує кілька технологій PON і послуги «точка-точка» одночасно. Є три варіанти розміру (FX-4, FX-8 і FX-16), які підходять для всіх типів оптоволоконних мереж: від сотень абонентів на FX-4 до тисяч абонентів на FX-16. Серія FX надає вам гнучкість у виборі оптоволоконної технології, щільності розгортання та стратегії розвитку, яка найкраще відповідає вашим техніко-економічним умовам, місцевим нормам і пропонованим послугам.



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд обладнання Lightspan FX - 2

Платформа повного обслуговування: домашні, мобільні та бізнес-додатки об'єднані на одній модульній платформі; послуги IPTV; мультимедійний сервіс; високошвидкісний доступ до Інтернету; бізнес доступ; зворотний зв'язок стільникового зв'язку [23].

Модульні полки:

- FX-16 (16 слотів для кінцевих плат лінії та 2 слоти для резервних мережевих карт)
- FX-8 (8 слотів для кінцевих карт лінії та 2 слоти для резервних мережевих карт)
- FX-4 (4 слоти для кінцевих плат лінії та 2 слоти для резервних мережевих карт)

Гнучкість технологій:

- GPON високої щільності, XGS-PON, Multi-PON, TWDM-PON і точка-точка.
- Неблокуюча об'єднувальна плата високої пропускної здатності 2 x 100 Гбіт/с на слот.
- Підтримує як традиційні моделі керування (версія ISAM для SNMP/MIB), так і програмування SDN (версія Lightspan для NETCONF/YANG).
- Підтримує спільний доступ до мережі та нарізку мережі між кількома службами та/або постачальниками вмісту [23].

3.5 Висновки до розділу 3

Отже, на сьогоднішній день більшість операторів обирають XGS-PON. Пов'язано це з тим, що довжини хвиль для XGS-PON відрізняються від інших стандартів, таких як G-PON і NG-PON2. Оскільки XGS-PON був оновленням стандарту XG-PON для забезпечення симетричної пропускної здатності, XG і XGS-PON працюють на однакових довжинах хвиль вгорі та внизу, це єдиний випадок повторного використання однакових довжин хвиль.

А користувачі потребують збільшити пропускну здатність для доступу FTTx через стрімке зростання споживання пропускної спроможності. Потреба все більшої та більшої ємності як доступу кінцевих користувачів, так транспортних мереж стає реальністю. Доведено, що WDM-PON може запропонувати більш високу пропускну здатність та охоплення, а також додаткові переваги щодо своїх додатків. Завдяки використанню виділеного каналу довжини хвилі для кожного абонента, WDM-PON часто вважається безпечнішим. Хоча переваги XG-PON полягають у стандартизації, зрілості, вартості та енергоспоживання.

Хочу зазначити, що нова лінійна карта Multi-PON у Nokia підтримує три режими роботи на кожному порту: режим GPON, режим XGS-PON або режим multi-PON, що підтримує GPON і XGS-PON одночасно з вбудованою функцією співіснування, тому немає потреби в зовнішньому обладнанні для спільного існування.

Оптичний лінійний термінал ZXA10 C300 надає повний сервіс оптичного доступу конвергентної платформи, забезпечуючи QoS операторського класу і надійність мережі для задоволення вимог для реалізації FTTx послуг та має багато особливостей.

ВИСНОВКИ

У роботі було проаналізовано технології WDM-PON (кожному кінцевому користувачеві виділяється лише одна довжина хвилі) і XG-PON (має структуру мережі, аналогічну GPON, з різними довжинами хвиль висхідного та низхідного потоків, але вони можуть співіснувати один з одним, щоб захистити інвестиції мережевих операторів).

Визначено, що для збільшення пропускної спроможності одного волокна може використовуватися технологія спектрального мультиплексування WDM (Wavelength Division Multiplexing), що дозволяє одночасно передавати кілька сигналів на різних довжинах хвиль по одному волокну. Ця властивість дозволяє багаторазово збільшити пропускну здатність волокна та досягти дуже високої швидкості передачі.

Пропускна здатність оптичного волокна є надзвичайно високою. Гранична швидкість передачі і найбільша відстань, що перекривається, залежать від згасання і широкосмугової лінії, а також від характеристик передавача і приймача. Використання одномодових волокон дозволяє побудувати лінію зв'язку довжиною понад 100 км зі швидкістю передачі кілька Гбіт/с без встановлення ретрансляторів.

Отже, WDM-PON може запропонувати більш високу пропускну здатність та додаткові переваги щодо застосування. За допомогою свого виділеного каналу довжини хвилі для кожного передплатника WDM-PON часто вважається більш безпечним. У той час як переваги XG-PON полягають у стандартизації, зрілості, вартості та енергоспоживання. Тенденція полягає в тому, що XG-PON призначений для житлових програм а WDM-PON досліджується для бізнесу або back-haul інтенсивної пропускної спроможності.

Запропоновано варіанти застосування обладнання різних виробників для побудови мереж за цими технологіями: нова лінійна карта Multi-PON у Nokia підтримує три режими роботи на кожному порту: режим GPON, режим XGS-PON або режим multi-PON, що підтримує GPON і XGS-PON одночасно з вбудованою

функцією співіснування, тому немає потреби в зовнішньому обладнанні для спільного існування; оптичний лінійний термінал ZXA10 C300 надає повний сервіс оптичного доступу конвергентної платформи, забезпечуючи QoS операторського класу і надійність мережі для задоволення вимог для реалізації FTТх послуг та має багато особливостей.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методы и модели анализа широкополосных сетей доступа [Электронный документ] - Режим доступа: https://info.aues.kz/dissertations/2014/frts/ae/Akbolat_AUES.pdf
2. Волоконно-оптична лінія зв'язку із застосуванням технології спектрального ущільнення каналів [Електронний документ] - Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/22976/1/Mykhailov_magistr.pdf
3. Організація широкопasmового доступу з використанням технології PON [Електронний документ] - Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41140/1/Vistunov_bakalavr.pdf
4. Оптико волоконні лінії зв'язку. Оптоволоконні лінії зв'язку [Електронний документ] - Режим доступу: <https://zapyt.ru/uk/optiko-volokonnye-linii-svyazi-optovolokonnye-linii-svyazi-v-zavisimosti/>
5. FTTH Принципы построения, технологии и решения для монтажа [Электронный документ] - Режим доступу: <https://www.twirpx.com/file/1338265/>
6. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [Электронный документ] - Режим доступу: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-18-24190&id=396718#ref12>
7. Fiber Optic Basics [Электронный документ] - Режим доступу: <https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>
8. Anatomy of a Cable – Optical Fiber [Электронный документ] - Режим доступу: <https://blog.biamp.com/anatomy-of-a-cable-optical-fiber/>
9. What is Fiber Optic Cable Structure and Advantages [Электронный документ] - Режим доступу: <https://electricalengineering123.com/fiber-optic-cable-structure-advantages/>
10. Рекомендації ITU G.656 і ITU G.657
11. Optical Transmission Lexicon: CATV, CWDM, DWDM, FTTH [Электронный документ] - Режим доступу: <https://pon.fibrain.com/artykuly-techniczne/optical-transmission-lexicon-catv-cwdm-dwdm-ftth,44.html>

12. Understanding ITU-T Standards for Various Optical Fibers [Електронний документ] - Режим доступу: <https://community.fs.com/blog/itu-t-standards-for-various-optical-fibers.html>

13. Performance Evaluation of Unidirectional TDM PON and WDM PON [Електронний документ] - Режим доступу: <https://www.ijsr.net/archive/v4i2/SUB151206.pdf>

14. Analysis of TDM and WDM PON [Електронний документ] - Режим доступу: http://faratarjome.ir/u/media/shopping_files/store-EN-1482654978-3035.pdf

15. Performance Analysis of Wavelength Division Multiplexing-Based Passive Optical Network Protection Schemes by Means of the Network Availability Evaluator [Електронний документ] - Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/15/7911/htm>

16. WDM-PON vs GPON vs XG-PON [Електронний документ] - Режим доступу: <https://community.fs.com/ru/blog/wdm-pon-vs-gpon-vs-xg-pon.html>

17. A Multilayer Comparative Study of XG-PON and 10G-EPON Standards [Електронний документ] - Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/1804.08007.pdf>

18. Towards Enhanced Mobile Broadband Communications - Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/10427>

19. Design, implementation, and evaluation of an XG-PON module for the ns-3 network simulator - Режим доступу: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0037549716682093#fig2-0037549716682093>

20. Проектування та експлуатація сучасних мереж широкопasmового доступу: навч. посіб. для дипломного проектування та магістерських робіт / [В.О. Балашов, А.Г. Лашко, Л.М. Ляховецький, В.І. Орешков]. – Одеса: РВЦ ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019. – 267 с.

21. Рекомендації ITU WDM PON (Recommendation ITU-T G.9802.1)

22. Рекомендації ITU XG-PON (Recommendation ITU-T G.987.2 (2016) – Amendment 2)

23. Lightspan FX - Режим доступа: <https://www.nokia.com/networks/fixed-networks/lightspan-fx/>
24. XGS-PON - Режим доступа: <https://www.viavisolutions.com/en-us/xgs-pon>
25. Multi-PON enables NG-PON migration your way - Режим доступа: <https://www.nokia.com/blog/multi-pon-enables-ng-pon-migration-your-way/>
26. Nokia and KPN successfully trial 25G PON in Rotterdam animal hospital - Режим доступа: <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/11/18/nokia-and-kpn-successfully-trial-25g-pon-in-rotterdam-animal-hospital/>
27. Leading operators and communications technology vendors sign 25GS-PON multisource agreement to accelerate development of 25G symmetric PON - Режим доступа: https://www.25gspon-msa.org/wp-content/uploads/2020/10/PR-25GSMSA_FINAL.pdf
28. NOKIA - Режим доступа: <https://www.nokia.com/>