



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерна інженерія \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Мукановському Ярославу Володимировичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Високошвидкісна оптична мережа інтернет-провайдера на основі технології WDM \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від “ 26 ” травня 2025 р. № 425 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 17 червня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи \_\_\_\_\_

1. Розробка комп'ютерної мережі установи \_\_\_\_\_

2. Опис організаційної структури установи \_\_\_\_\_

3. Вимоги до швидкості передачі інформації в мережі \_\_\_\_\_

4. Перелік використаних програмних засобів: ОС Windows 10 \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

1. Аналіз стану проблеми \_\_\_\_\_

2. Огляд сучасних та майбутніх технологій передачі даних \_\_\_\_\_

3. Огляд сучасних та майбутніх тенденцій побудови мультисервісних мереж \_\_\_\_\_

4. Розробка загальної структури мережі установи \_\_\_\_\_

5. Аналіз та вибір апаратних засобів реалізації \_\_\_\_\_

6. Висновки \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій 16 слайдів

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми та методів її вирішення	26.05.25-28.05.25	
2	Аналіз роботи підприємства	29.05.25-05.06.25	
3	Розробка структури корпоративної мережі підприємства	06.06.25-09.06.25	
4	Вибір апаратних засобів реалізації мережі	10.06.25-11.06.25	
5	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	12.06.25-14.08.25	
6	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	15.06.25	

Дата видачі завдання “ 26 ” травня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

ст. викл. Станіслав ПАРТИКА  
(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 56 с., 22 рис., 1 табл., 1 дод., 10 джерел.

FTTX, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ПАСИВНА ОПТИЧНА МЕРЕЖА, ТОЧКА-ТОЧКА, ТОЧКА-БАГАТОТОЧКА, ШИРОКОСМУГОВИЙ, INTERNET, WDM, DWDM.

Метою кваліфікаційної роботи є проектування інформаційної мережі провайдера Інтернет-послуг на основі технології WDM. Метод дослідження – аналітичний із використанням сучасних комп'ютерних технологій.

У роботі здійснено вибір базової топології мережі та технології передачі даних. Розроблено структурну та функціональну схеми мережі підприємства.

Предметом розробки є сучасні корпоративні мережі, задачі, які вони реалізують, потреби корпоративних користувачів, а також обладнання, що використовується при побудові активної та пасивної частин мережі передачі даних.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis: 56 pages, 22 figures, 1 tables, 1 appendices, 10 sources.

FTTX, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ПАСИВНА ОПТИЧНА МЕРЕЖА,  
ТОЧКА-ТОЧКА, ТОЧКА-БАГАТОТОЧКА, ШИРОКОСМУГОВИЙ,  
INTERNET, WDM, DWDM

Метою кваліфікаційної роботи є проектування інформаційної мережі провайдера Інтернет-послуг на основі технології WDM. Метод дослідження – аналітичний із використанням сучасних комп'ютерних технологій.

У роботі здійснено вибір базової топології мережі та технології передачі даних. Розроблено структурну та функціональну схеми мережі підприємства.

Предметом розробки є сучасні корпоративні мережі, задачі, які вони реалізують, потреби корпоративних користувачів, а також обладнання, що використовується при побудові активної та пасивної частин мережі передачі даних.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	7
ВСТУП .....	8
1 АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА МАГІСТРАЛЬНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ .....	10
1.1 Переваги волоконно-оптичних ліній зв'язку .....	10
1.2 Мультиплексування в оптичних системах .....	12
1.2.1 Часове мультиплексування .....	12
1.2.2 Хвильове мультиплексування WDM .....	15
1.3 Порівняння WDM і TDM .....	17
1.4 Основні принципи технології щільного хвильового мультиплексування .....	19
2 АРХІТЕКТУРА FTTH.....	24
3 ПАСИВНІ ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ .....	27
3.1 APON .....	28
3.2 BPON .....	28
3.3 GPON .....	29
3.4 EPON .....	29
3.5 WDM-PON .....	30
4 ПРОЄКТ МЕРЕЖІ WDM-PON .....	32
4.1 Розташування мережі.....	32
4.2 Технологія побудови оптичних трас .....	34
4.3 Використана технологія .....	39
4.4 Баланс оптичного бюджету.....	44
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	47
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	48

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

CWDM – зрізжені (грубе) мультиплексування з поділом по довжині хвилі (англ., Coarse Wavelength Division Multiplexing)

DWDM – щільне мультиплексування з поділом по довжині хвилі (англ., Dense Wavelength Division Multiplexing)

DCF – волокно компенсує дисперсію (англ., Dispersion Compensating Fibers)

FTTB – волокно до будівлі (англ. Fiber to the Building)

FTTH – волокно до дому (англ. Fiber to the Home)

Multi Dwelling Unit)

FTTN – волокно до розподільчого вузла (англ. Fiber To The Node)

FTTO – волокно до офісу (англ. Fiber To The Office)

PON – пасивні оптичні мережі (англ., Passive Optical Network)

STM Module – синхронний транспортний модуль (англ., Synchronous Transport)

SDH – синхронна цифрова ієрархія (англ., Synchronous Digital Hierarchy)

UDWDM – надщільне мультиплексування з поділом по довжині хвилі (англ., Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing)

WDM – мультиплексування з поділом по довжині хвилі (англ., Wavelength Division Multiplexing)

## ВСТУП

Оптичне волокно вважається найефективнішим середовищем для передавання даних і залишається єдиною технологією, здатною забезпечити повноцінну підтримку послуг наступного покоління. Воно характеризується високою пропускнуою здатністю, можливістю передавання сигналу на значні відстані без погіршення якості, стійкістю до електромагнітних завад, а також підвищеним рівнем безпеки переданої інформації. Завдяки своїм властивостям, оптичне волокно дозволяє забезпечити стабільний і надійний канал зв'язку, що є критично важливим у сучасних умовах цифрової трансформації.

Використання технології пасивних оптичних мереж (PON) дозволяє мінімізувати потребу в повторювачах та оптичних підсилювачах. Це, у свою чергу, веде до зниження вартості первинного впровадження, зменшення енергоспоживання, зниження кількості можливих точок відмови, а також до зменшення обсягів займаного обладнання простору.

Сучасні вимоги до інфраструктури телекомунікацій обумовлені зростаючою популярністю широкосмугових сервісів, таких як телебачення високої чіткості, Інтернет-доступ і цифрові інтерактивні платформи. Це стимулює операторів зв'язку вдосконалювати свої мережі для якісного та ефективного обслуговування як житлового сектору, так і малого бізнесу. Щоб реалізувати такі сервіси, необхідно дотримуватись високих технічних стандартів при одночасному контролі витрат на будівництво та обслуговування мереж.

Оптимальним підходом до масштабування пропускнуої здатності мереж є застосування технології мультиплексування з поділом довжини хвилі (WDM). Для великих відстаней доцільним є використання щільного поділу довжин хвиль (DWDM), тоді як для мереж доступу найбільш раціональним є грубий поділ (CWDM), який забезпечує баланс між вартістю компонентів та

якістю послуг. Використання інтервалів каналів шириною 20 нм у CWDM дозволяє зменшити вимоги до технічних характеристик фільтрів, мультиплексорів, демультимплексорів, а також активних елементів, таких як лазери, що значно здешевлює реалізацію мережі.

Побудова мережі передбачає реалізацію двох основних етапів проєктування. Перший – це проєктування пасивної оптичної мережі, яка включає всі структурні елементи від центрального офісу до абонентського обладнання. Другий – проєктування активної частини мережі, що охоплює вибір обладнання для передавання даних, необхідного для забезпечення роботи кінцевих сервісів та управління мережею.

# 1 АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА МАГІСТРАЛЬНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Переваги волоконно-оптичних ліній зв'язку

Сучасні телекомунікації важко уявити без волоконно-оптичних ліній зв'язку. Щорічно по всьому світу прокладаються тисячі кілометрів оптоволокна. Однак, серйозну конкуренцію іншим видам дротового зв'язку воно склало відносно недавно. За відносно невеликий термін свого розвитку ВОЛЗ зайняли провідну позицію в системах передачі інформації, стали найважливішою ланкою в інформаційній інфраструктурі сучасного суспільства. ВОЛЗ – це волоконно-оптична лінія зв'язку, яка складається з пасивних і активних елементів, призначених для передачі оптичного (світлового) сигналу по оптоволоконному кабелю [1]. Оптоволоконні мережі мають величезні переваги перед звичайними лініями (коаксіальний кабель), які сприйнятливі до електромагнітних полів, що позначається на якості передачі сигналу.

Оптоволоконні мережі не мають такого недоліку, крім цього вони мають ряд переваг – широка смуга пропускання (частота 10<sup>14</sup>Гц, дозволяє передавати до декількох терабіт в секунду), на основі цієї технології можна створювати лінії до ста кілометрів, які мають високий захист від перешкод, так як матеріал оптоволокна несприйнятливий до електромагнітних завад. Такий кабель набагато легше мідного і менше за обсягом. До того ж термін служби подібних оптоволоконних ліній становить двадцять п'ять років.

Широка смуга пропускання – обумовлена надзвичайно високою частотою несучої 10<sup>14</sup>Гц дає потенційну можливість передачі по одному оптичному волокну потоку інформації в кілька терабіт в секунду. Велика смуга пропускання – це одне з найбільш важливих переваг оптичного волокна над мідним або будь-яким іншим середовищем передачі інформації.

Низький рівень шумів у волоконно-оптичному кабелі дозволяє збільшити смугу пропускання, шляхом передачі різної модуляції сигналів з малою надмірністю коду. Оскільки волокно виготовлено з діелектричного матеріалу, воно несприйнятливо до електромагнітних перешкод з боку оточуючих мідних кабельних систем і електричного обладнання, здатного індукувати електромагнітне випромінювання (лінії електропередачі, електродвигунні установки і т.д.). У багатоволоконних кабелях також не виникає проблеми перехресного впливу електромагнітного випромінювання, властивої багатопарним мідним кабелям.

Оскільки ВОК практично не випромінює в радіодіапазоні, то передану по ньому інформацію важко підслухати, не порушуючи прийому-передачі. Системи моніторингу (безперервного контролю) цілісності оптичної лінії зв'язку, використовуючи властивості високої чутливості волокна, можуть миттєво відключити «зламувати» канал зв'язку і подати сигнал тривоги. Сенсорні системи, що використовують інтерференційні ефекти розповсюджуваних світлових сигналів (як за різними волокнами, так і різною поляризацією) мають дуже високу чутливість до коливань, до невеликих перепадів тиску. Такі системи особливо необхідні при створенні ліній зв'язку в урядових, банківських і деяких інших спеціальних службах, що пред'являють підвищені вимоги до захисту даних [1].

Волокно виготовлено з кварцу, основу якого складає двоокис кремнію, широко розповсюдженого, а тому недорогого матеріалу, на відміну від міді. В даний час вартість волокна по відношенню до мідної пари співвідноситься як 2:5. При цьому ВОК дозволяє передавати сигнали на значно більші відстані без ретрансляції. Кількість повторювачів на протяжних лініях скорочується при використанні ВОК. При використанні солітонних систем передачі досягнуті дальності в 4000 км без регенерації (тобто тільки з використанням оптичних підсилювачів на проміжних вузлах) при швидкості передачі вище 10 Гбіт/с [1].

## 1.2 Мультиплексування в оптичних системах

### 1.2.1 Часове мультиплексування

Смуга пропускання оптичного волокна значно ширше, ніж потрібно на практиці будь-якого окремо взятого з додатком. Необхідність максимально ефективно використовувати можливості передачі інформації через оптичне волокно послужила поштовхом для інтенсивних досліджень [2].

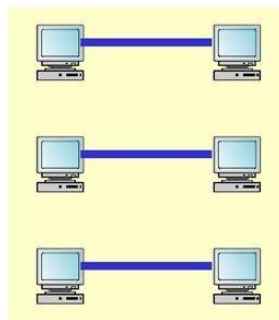


Рисунок 1.1 – Передача даних без мультиплексування

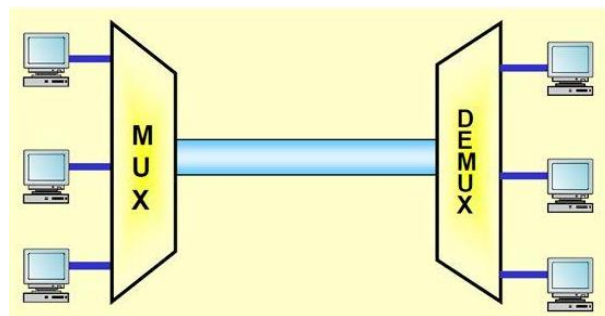


Рисунок 1.2 – Принцип передачі інформаційних каналів в системах TDM

Першою стали застосовувати технологію TDM (рисунок 1.2), яка широко використовується в звичайних системах електрозв'язку. Ця технологія передбачає об'єднання декількох вхідних низькошвидкісних каналів в один складовий високошвидкісний канал. Вхідні канали по черзі модулюють високочастотну несучу протягом виділених їм коротких проміжків часу (тайм-слотів), які періодично повторюються. Наприклад, протягом першого тайм-слота несуча модулюється першим вхідним каналом,

протягом другого – другим, протягом третього – третім, протягом четвертого – четвертим, протягом п'ятого – знову першим, протягом шостого – знову другим і т. д. відповідно до рисунку 1.3.

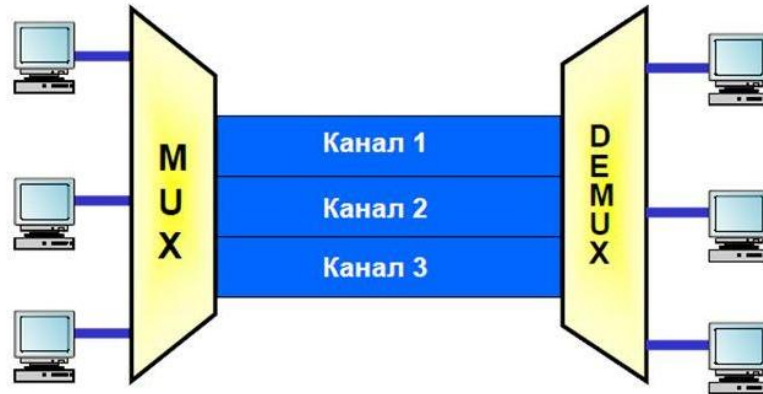


Рисунок 1.3 – Технологія TDM

Мультиплексор на одній стороні каналу зв'язку збирає дані з усіх джерел і передає їх по волокну протягом відповідних тайм-слотів. Демультимплексор на іншій стороні лінії зв'язку виділяє тайм-слоти, зчитує дані і передає їх відповідним користувачам вже у вигляді єдиних вихідних потоків.

Використання технології TDM дозволило збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних ліній зв'язку до 10 Гбіт/с. Лінії зі швидкістю 10 Гбіт/с будуть поступово замінювати спочатку використовувалися системи TDM зі швидкістю 2,5 Гбіт/с. Швидкість передачі 10 Гбіт/с в деякому роді розмежує два типи систем TDM. Вище за цю швидкість деякі основні характеристики оптичного волокна – поляризаційна модова дисперсія, хроматична дисперсія – починають значно впливати на якість передачі і повинні прийматися до уваги при розробці систем зв'язку. Це є серйозною перешкодою для розробок систем TDM зі швидкостями передачі 40 Гбіт/с і вище. Крім того, для подальшого збільшення швидкості потрібні нові методи модуляції лазерного випромінювання, що веде до зростання складності і вартості приймально-передавального обладнання [2].

Незважаючи на всі труднощі, швидкість передачі в цифрових мережах зв'язку постійно зростає. У 1999 році була досягнута швидкість 40 Гбіт/с (рівень STM-256). Найбільші телекомунікаційні компанії вже повідомили про проведення успішних лабораторних випробувань систем передачі зі швидкістю 40 Гбіт/с на лініях зв'язку протяжністю 100 км і більше. Експериментальні лінії зв'язку рівня STM-256 поки ще не в повному обсязі підтримують функції введення і виведення каналів ADM (Add/Drop Multiplexing) та крос-комутації [2].

Очікується швидка поява на ринку обладнання цифрових систем передачі, що забезпечують мультиплексування потоків в високошвидкісні потоки рівня STM-256. По всій видимості, перші лінії зв'язку рівня STM-256 будуть застосовуватися в мережах міського і регіонального масштабу. У міру збільшення дальності передачі і появи більш досконалих методик компенсації різних негативних факторів лінії зв'язку рівня STM-256 будуть знаходити все більш широке застосування. Можливо, в деяких випадках для збільшення дальності таких ліній зв'язку комерційно вигідніше буде використовувати регенерацію сигналу.

Однією з перспективних технологій наддалекого зв'язку вважається солітонна передача даних. Солітон – це особливий вид світлового імпульсу, який при поширенні в певному середовищі, і зокрема – оптичному волокні, зберігає свою форму (переважно гауссову). При посиленні солітону через рівні відстані, теоретично він може поширюватися як завгодно далеко. Це пов'язано з тим, що показник заломлення середовища, в якому поширюється солітон, має невелику добавку, яка квадратично залежить від потужності сигналу. При малих потужностях сигналу цією добавкою можна знехтувати. Однак при поширенні солітону, що представляє собою хвильовий пакет великої потужності, нелінійні явища і хроматична дисперсія при певних умовах можуть компенсувати зміни форми солітону. При цьому солітон має виняткову стабільність параметрів поширення і стійкість до зовнішніх збурень.

Незважаючи на те, що дальність поширення солітонів і обмежена загасанням сигналу в волокні, ця технологія може успішно застосовуватися для передачі сигналів великої потужності на великі відстані.

Незалежно від того, чи стане технологія TDM універсальним протоколом, таким як IP, або буде адаптована відповідно до стандартів SONET/SDH, в найближчі роки її будуть використовувати багато операторів. «Друге дихання» технології TDM забезпечили успіхи у вивченні солітонів. Якби проблеми не виникали в технології TDM і якби шляхи їх вирішення не використовувалися, жодна існуюча технологія не може замінити її в даний час. Однак технологія WDM може використовуватися паралельно з технологією TDM для підвищення її ефективності.

### 1.2.2 Хвильове мультиплексування WDM

У технології WDM немає багатьох обмежень і технологічних труднощів, властивих TDM. Для підвищення пропускної здатності, замість збільшення швидкості передачі в єдиному складеному каналі, як це реалізовано в технології TDM, в технології WDM збільшують число каналів (довжин хвиль), що застосовуються в системах передачі [2].

Зростання пропускної здатності при використанні технології WDM здійснюється без дорогої заміни оптичного кабелю. Застосування технології WDM дозволяє здавати в оренду не тільки оптичні кабелі або волокна, а й окремі довжини хвиль, тобто реалізувати концепцію «віртуального волокна». По одному волокну на різних довжинах хвиль можна одночасно передавати найрізноманітніші програми – кабельне телебачення, телефонію, трафік Інтернет, «відео на вимогу» і т.д. Як наслідок цього, частина волокон в оптичному кабелі можна використовувати для резерву (рисунок 1.4).

Застосування технології WDM дозволяє виключити додаткову прокладку оптичних кабелів в існуючій мережі. Навіть якщо в майбутньому вартість волокна зменшиться за рахунок використання нових технологій,

волоконно-оптична інфраструктура (прокладене волокно та встановлене обладнання) завжди буде коштувати досить дорого. Для її ефективного використання, необхідно мати можливість протягом довгого часу збільшувати пропускну здатність мережі і змінювати набір послуг, що надаються без заміни оптичного кабелю. Технологія WDM надає саме таку можливість.

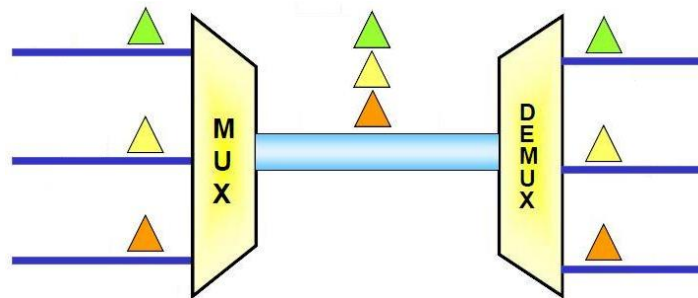


Рисунок 1.4 – Технологія WDM

Технологія WDM поки застосовується в основному на лініях зв'язку великої протяжності, де потрібна велика смуга пропускання. Мережі міського та регіонального масштабу і системи кабельного телебачення потенційно також є широким ринком для технології WDM.

Необхідність ефективно використовувати прокладений кабель призвела до значного збільшення числа каналів, що передаються по одному волокну, і зменшення відстані між ними. В даний час системи з частотним інтервалом між каналами 100 ГГц ( $\sim 0,8$  нм) і менше називають системами щільного хвильового мультиплексування DWDM. Теоретично можлива передача в будь-якому діапазоні довжин хвиль, однак практичні обмеження залишають для використання в системах WDM вузький діапазон в околиці довжини хвилі 1550 нм [2]. Але навіть цей діапазон надає величезні можливості для передачі даних.

Численні переваги систем DWDM відображаються на їх ціні. По-перше, стають виключно важливими багато властивостей оптичних компонентів і характеристики оптичного кабелю. По-друге, вимоги до

архітектури мережі і вибору компонентів систем WDM є більш жорсткими, ніж, наприклад, для систем TDM рівня STM-16. Спільне застосування технологій TDM і WDM дозволяє значно розширити спектр послуг, що надаються, залишаючи практично без змін більшу частину наявного обладнання.

Застосування технології WDM дає численні переваги, однак вимагає високого рівня підготовки технічного персоналу і сучасного контрольно-вимірювального обладнання.

### 1.3 Порівняння WDM і TDM

Обидві технології WDM і TDM застосовуються для збільшення інформаційної пропускної здатності мережі. Хоча вони не виключають, а скоріше доповнюють одна одну, можна порівняти такі їх характеристики, як гнучкість структури ліній зв'язку, швидкість передачі і вплив на відносний рівень помилок по бітам.

В принципі, технологія TDM дає можливість передачі по лінії зв'язку каналів, різнорідних за типом переданих даних. Технологія TDM дозволяє розділити волоконно-оптичний кабель на безліч каналів, по яких з різними швидкостями передаються різні типи трафіку. Можуть бути різні способи розподілу тайм-слотів. Вони можуть бути постійно закріплені за певними програмами або виділятися на вимогу DAMA (Demand Assignment Multiple Access).

Можна змінювати тривалість тайм-слотів або повністю їх скоротити. В останньому випадку дані передаються у вигляді окремих пакетів, кожен з яких включає адресу джерела і відправника (статистичне мультиплексування). Незважаючи на всі ці можливості, технологія TDM працює найкраще, коли за всіма логічних каналах передається один тип трафіку, а всі тайм-слоти мають однакову тривалість і постійно закріплені за окремими каналами [3].

У технології WDM канали повністю незалежні, а тому вона дає більшу гнучкість, ніж технологія TDM. Технологія WDM дозволяє без будь-яких труднощів передавати по лінії зв'язку безліч каналів, тип трафіку і швидкість передачі даних в кожному з яких може мати відчутні відмінності. За різними каналами WDM в одному волокні може передаватися трафік Ethernet (10/100/1000Мбіт/с), цифрове відео та тестові сигнали, і ця система буде легко справлятися.

Додати нові стрічки в існуючу систему WDM не викликає проблем і не вимагає заново розподіляти всі тайм-слоти, як в технології TDM.

В технології TDM пропускна здатність збільшується за рахунок збільшення швидкості передачі бітів в лінії зв'язку. Наскільки швидкою може бути зроблена ця швидкість – в межах визначених фундаментальних обмежень оптичного волокна – залежить від використовуваних електронних компонентів. Щоб отримувати дані від кожного джерела, зберігати їх, передавати напротязі відповідних тайм-слотів, зчитувати і коректно доставляти одержувачу, потрібне застосування цифрових інтегральних схем. Всі ці цифрові компоненти повинні працювати зі швидкістю, чи майже на сумарній швидкості передачі лінії зв'язку. Тобто, для кожного каналу, незалежно від його пропускної здатності, має бути встановлено електронне обладнання, здатне підтримувати повну пропускну здатність лінії зв'язку.

Оптичне волокно дозволяє передавати дані зі швидкістю в кілька Тбіт/с, в той час як комерційно доступні цифрові електронні пристрої в даний час виконують лише близько 1 мільярда операцій в секунду (1 Гбіт/с). Незважаючи на те, що швидкодія електронних пристроїв продовжує рости, технологія TDM завжди матиме економічні обмеження через необхідність установки на кожен канал найсучаснішого обладнання. Навряд чи за допомогою технології TDM коли-небудь буде досягнута сумарна швидкість передачі по лінії зв'язку, співмірна з величезною пропускну здатністю волоконно-оптичного кабелю. Це обмеження стосується як глобальних, так і локальних мереж передачі даних.

Хоча до кінцевого електронного обладнання для окремих каналів WDM і висуваються певні вимоги, як і в системах TDM, все інше обладнання в каналі може підтримувати тільки швидкість передачі по цьому каналу, а не повну швидкість складеного сигналу. Таким чином, повна пропускна здатність лінії зв'язку не обмежена швидкістю роботи використовуваних електронних пристроїв. При необхідності, повну пропускну здатність можна збільшити в будь-який момент, просто додавши в існуючу систему WDM кілька каналів. Найшвидшу лінію зв'язку TDM, яку тільки можна створити з використанням найсучаснішої техніки, в системі WDM можна передавати як один з багатьох каналів. Технологія WDM дозволяє досягти сумарної швидкості передачі по лінії зв'язку, яка порівнянна з величезною пропускну здатністю, що надається оптичним волокном [3].

#### 1.4 Основні принципи технології щільного хвильового мультиплексування

Історично першими виникли двоххвильові WDM системи, що працюють на центральних довжинах хвиль з другого і третього вікон прозорості кварцового волокна (1310 і 1550 нм). Цей спосіб дозволяє або подвоїти швидкість передачі по одному оптичному волокну, або організувати дуплексний зв'язок [2].

Сучасні WDM системи на основі стандартного частотного плану (ITU-T Rec. G.692) можна поділити на три групи:

- грубі WDM (CoarseWDM – CWDM) системи з частотним розносом каналів не менше 200 ГГц, що дозволяють мультиплексувати не більше 18 каналів (працюють в смузі від 1270нм до 1610нм);
- щільні WDM (DenseWDM – DWDM) системи з рознесенням каналів не менше 100 ГГц. Щільне спектральне мультиплексування дозволяє одночасно передавати по одному оптичному волокну до 160 незалежних інформаційних каналів на різних оптичних несучих (довжинах хвиль);

- високощільні WDM (HighDenseWDM – HDWDM) системи з рознесенням каналів 50 ГГц і менше, що дозволяють мультиплексувати не менше 64 каналів.

Частотний план для DWDM систем визначається стандартом ІТУ G.694.1. Згідно з рекомендаціями ІТУ в DWDM системах використовуються «С» (1525 ... 1565нм) і L"(1570 ... 1610нм) вікна прозорості. У кожен діапазон потрапляють по 80 каналів з кроком 0.8нм (100ГГц). Зазвичай використовується тільки «С» діапазон, оскільки кількості каналів, які можна організувати в цьому діапазоні і так вистачає з надлишком, до того ж затухання в волокні стандарту G.652 в С-діапазоні трохи нижче, ніж в L-діапазоні [4].

До технології DWDM використовувалася технологія хвильового мультиплексування WDM (Wave Division Multiplexing) в якій використовується лише чотири канали у вікнах прозорості 1310 нанометрів і 1550 нанометрів з інтервалом кроку від 400 до 800 гігагерц. Мультиплексування DWDM називається «ущільненим» через те, що в ньому використовується маленьке дистанція між довжинами хвиль ніж в WDM.

Основною проблемою при створенні надщільних систем DWDM є те, що зі зниженням довжини кроку частот відбувається накладення каналів один на одного. В результаті чого збільшується кількість помилок і неможливість передачі даних, на рисунку 1.5 зображено приклад накладення каналів.

При застосуванні оптичного ущільнення по довжинах хвиль в оптичному мультиплексорі трапляються істотні оптичні втрати.

Через такі втрати скорочуються можливості передачі на більш далекі відстані передачі, тому без застосування оптичних підсилювачів система не здатна працювати. Щоб вирівняти оптичні втрати в оптичному мультиплексорі застосовується волоконно-оптичний підсилювач потужності (BOOSTER). У випадки нестачі потужності застосовується оптичний підсилювач на приймальному кінці [4].

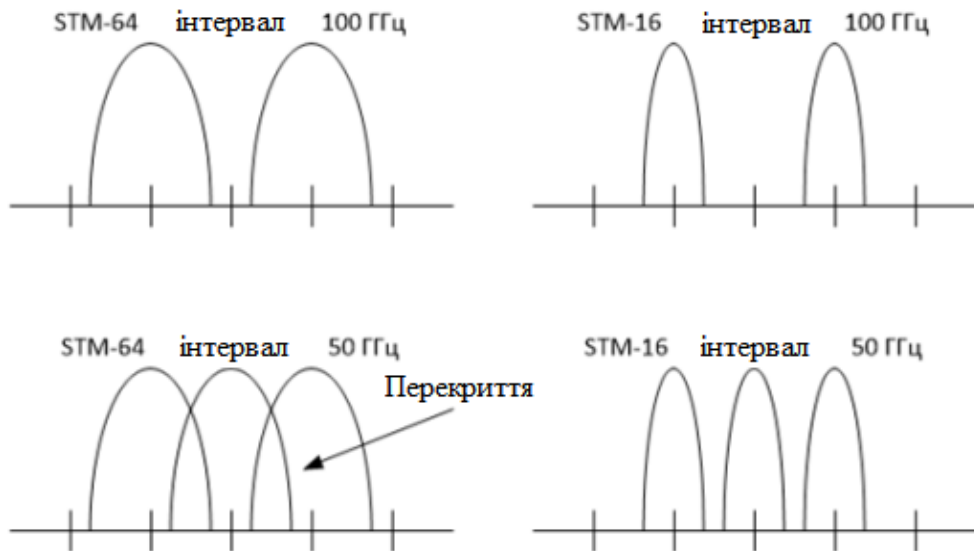


Рисунок 1.5 – Вид спектру хвиль для двох частотних планів

Технологія DWDM дозволила з'єднати передачу змішаного трафіку. Для цього кожному виду трафіку виділяються оптичний канал або довжина хвилі. Це відбувається подібно до того, як видиме людським оком світло складається з різних кольорів, на які можна його розкласти, а потім знову зібрати, так і переданий за технологією DWDM світловий потік, складається з різних довжин хвиль ( $\lambda$ ). На рисунку 1.7 наведено схематичний приклад проходження різних довжин хвиль в одному волокні.

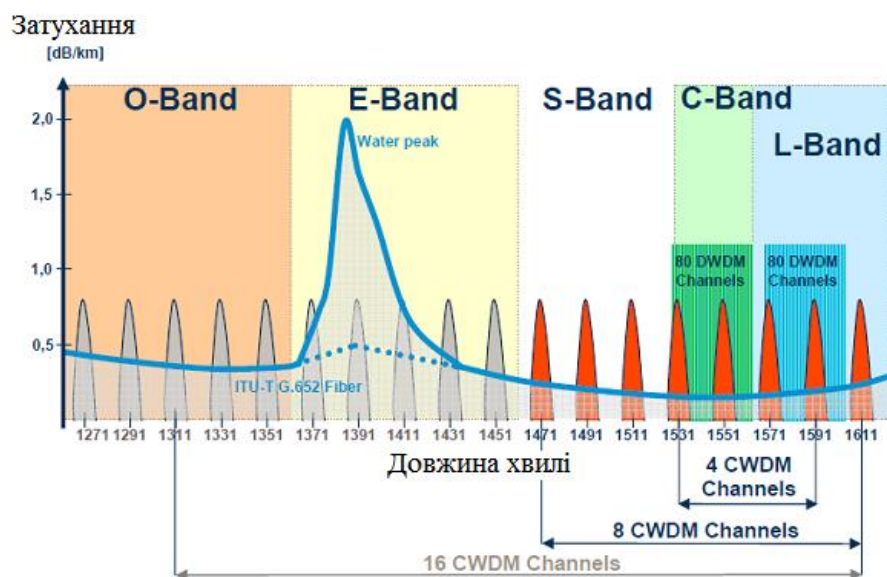


Рисунок 1.6 – Розподіл довжин хвиль за діапазонами

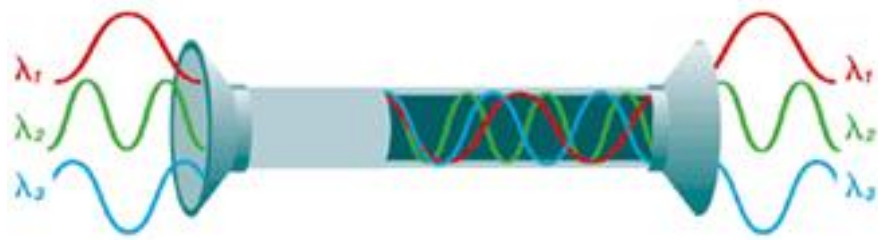


Рисунок 1.7 – Приклад проходження різних довжин хвиль в одному волокні

Тобто по одному волокну можна передавати більше сотні стандартних каналів. Принципова схема DWDM досить проста. Для того щоб організувати в одному волокні кілька оптичних каналів сигнали «забарвлюють», тобто змінюють оптичну довжину хвилі для кожного такого сигналу. «Пофарбовані» сигнали змішуються за допомогою мультиплексора і передаються в оптичну лінію. В кінцевому пункті відбувається зворотна операція – «забарвлені» сигнали виділяються з групового сигналу і передаються споживачеві. Приклад процесу об'єднання/виділення різних оптичних сигналів наведено на рисунку 1.8.

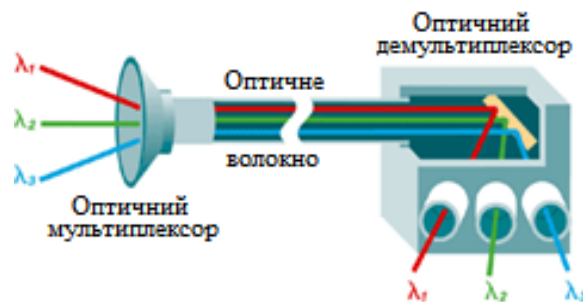


Рисунок 1.8 – Процес об'єднання/виділення оптичних сигналів

Природно, що для того щоб передавати по одному волокну безліч хвильових потоків, технологія DWDM забезпечена обладнанням особливої точності.

Головними перевагами мереж DWDM є:

- високі швидкості передачі;
- висока утилізація оптичних волокон;

- можливість забезпечити захист на основі кільцевої топології;
- дозволяє використання будь-яких технологій канального рівня завдяки прозорості каналів оптичних волокон;
- можливість простого нарощування каналів в оптичній магістралі.

Особливість технології DWDM – це відсутність регенераторів, що застосовуються в мережах SDH. Недолік систем електричної регенерації сигналів в тому, що вони повинні сприймати певний вид кодування, що робить їх дуже дорогими. Оптичні підсилювачі, які «прозора» передають інформацію, дозволяють нарощувати швидкість магістралі без необхідності модернізувати підсилювальні блоки. Протяжність ділянки між оптичними підсилювачами може досягати 150 кілометрів і більше, що забезпечує економічність створюваних магістралей DWDM, в яких довжина мультиплексної секції становить на сьогодні 600-5000 км при застосуванні від одного до семи проміжних оптичних підсилювачів. [5]

## 2 АРХІТЕКТУРА FTTX

У сучасних телекомунікаційних мережах для організації широкосмугового доступу в будинках, багатоквартирних житлових комплексах та малому бізнесі дедалі частіше використовується технологія PON, реалізована у вигляді архітектури типу Fibre-to-x, або FTTx (рисунок 2.1). Ця модель забезпечення доступу базується на розгортанні оптичного волокна до певної точки, максимально наближеної до кінцевого користувача, що значно підвищує якість та швидкість передавання даних [5].

Мережі FTTH (Fibre-to-the-Home) є складовою частиною широкого сімейства рішень FTTx. Вони відзначаються високою пропускнуою здатністю та здатністю передавати великі обсяги цифрової інформації з високою швидкістю безпосередньо до користувача. Технології цього класу базуються на використанні оптичного волокна як основного середовища передачі, що забезпечує переваги у вигляді підвищеної надійності, зменшення завад та зниження затухання сигналу.

Ступінь проникнення оптичного волокна в мережі FTTx варіюється залежно від відстані, на яку це волокно прокладається від центрального офісу до споживача. Чим ближче прокладене волокно до кінцевої точки обслуговування, тим вищий рівень якості передачі та вищі інвестиційні витрати. Відповідно, виникають різні підтипи архітектури FTTx.

Один із варіантів – FTTB (Fibre-to-the-Building) – передбачає прокладення оптичного волокна від центрального вузла до будівлі підприємства, що дозволяє забезпечити високоякісний зв'язок для бізнес-користувачів. Іншим різновидом є FTTC (Fibre-to-the-Curb), коли волоконно-оптичний кабель доходить лише до точки, що знаходиться на відстані приблизно 300 метрів від кінцевого користувача, після чого сигнал передається за допомогою інших типів кабелів, таких як коаксіальні або виті пари.

Найповнішою реалізацією технології є FTTN – безпосереднє підключення волокна до домогосподарства, що забезпечує максимальну якість зв'язку.

Варто зазначити, що мережі FTТх підтримують різні логічні конфігурації, такі як дерево, зірка, шина або кільце, із можливістю використання як пасивних, так і активних мережевих компонентів, залежно від структури та потреб конкретного об'єкта. Вибір типу архітектури визначається як технічними параметрами, так і економічними міркуваннями – наприклад, у випадку FTTB оператори зв'язку можуть швидше окупити витрати завдяки вищому середньому доходу від бізнес-клієнтів, порівняно з індивідуальними користувачами в FTTN [5].

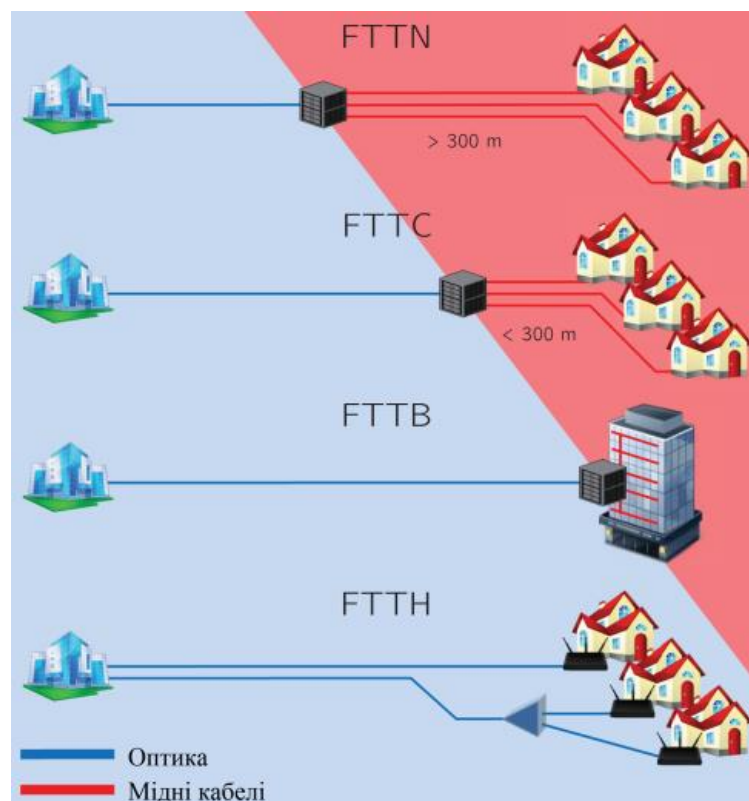


Рисунок 2.1 – Архітектура мережі доступу FTТх

Інші варіанти архітектури FTТх включають такі моделі, як FTTN, FTTO, FTTP та FTТУ, які відрізняються ступенем наближення оптичного волокна до кінцевого споживача.

FTTN (Fibre-to-the-Node) передбачає прокладення волоконно-оптичного кабелю до вузла, розташованого в межах одного кілометра (приблизно 3000 футів) від житлових будинків чи підприємств. Такий підхід дозволяє значно скоротити витрати порівняно з повноцінним FTTH, залишаючи останню ділянку доступу на основі традиційних мідних технологій..

FTTO (Fibre-to-the-Office) за своєю структурою є аналогом FTTB, але орієнтованим на корпоративний сектор. У цьому випадку оптичне з'єднання забезпечується безпосередньо до офісного приміщення бізнес-клієнта, що дозволяє реалізувати високопродуктивні сервіси з мінімальними затримками та максимальною надійністю.

FTTP (Fibre-to-the-Premises) є узагальнювальним поняттям, що охоплює всі підходи до побудови оптичного підключення до об'єкта кінцевого користувача. У цьому контексті термін об'єднує як моделі FTTH, так і FTTB, надаючи більш універсальний опис інфраструктури. Реалізація FTTP може ґрунтуватися на різних технологічних платформах, таких як BPON, EPON або GPON.

У рамках деяких комерційних ініціатив застосовується також термін FTTU (Fibre-to-the-User). Наприклад, компанія Alcatel використовує цю назву для позначення рішень, спрямованих на забезпечення доступу як у форматі FTTB, так і FTTH. Такий підхід акцентує увагу на кінцевому користувачі як центральному елементі мережевої інфраструктури.

Застосування волоконно-оптичних технологій для підключення кінцевих користувачів дозволяє створити інфраструктуру, максимально адаптовану до сучасних та перспективних вимог. Незважаючи на значні капітальні витрати на початковому етапі розгортання, можливість багаторазового використання фізичної інфраструктури забезпечує швидке повернення інвестицій, роблячи оптичні мережі ефективним і довготривалим рішенням.

### 3 ПАСИВНІ ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ

Пасивні оптичні мережі (PON) становлять одне з найпоширеніших рішень для реалізації широкосмугового доступу в сучасних телекомунікаційних системах. Їхньою головною відмінністю є відсутність активних елементів у лінійному тракті між центральним вузлом оператора зв'язку та абонентським обладнанням. Застосування виключно пасивних компонентів, таких як оптичні розгалужувачі й сплітери, сприяє значному зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню надійності мережі та спрощенню її обслуговування [6].

Архітектура PON ґрунтується на багатоточковій схемі доступу, яка забезпечує передачу сигналу від центрального вузла до декількох кінцевих користувачів одночасно, без потреби в індивідуальному з'єднанні для кожного абонента.

Така реалізація відповідає концепції FTTP, за якої оптичне волокно прокладається безпосередньо до житлового чи комерційного приміщення користувача, а розподіл сигналу здійснюється за допомогою пасивних елементів інфраструктури.

З метою гарантування конфіденційності переданих даних у мережах PON застосовуються криптографічні методи захисту, що унеможливають несанкціонований доступ до інформації з боку інших користувачів. Крім того, протоколи доступу до мережевого середовища організовано таким чином, щоб виключити одночасну передачу даних кількома абонентами, що дозволяє запобігати виникненню колізій і збоїв у роботі мережі [6].

Отже, пасивні оптичні мережі доступу є надійним, ефективним і економічно доцільним рішенням для побудови інфраструктури високошвидкісного зв'язку. Вони поєднують у собі переваги широкої смуги пропускання, мінімальних експлуатаційних витрат та гнучкості масштабування відповідно до зростаючих потреб кінцевих споживачів.

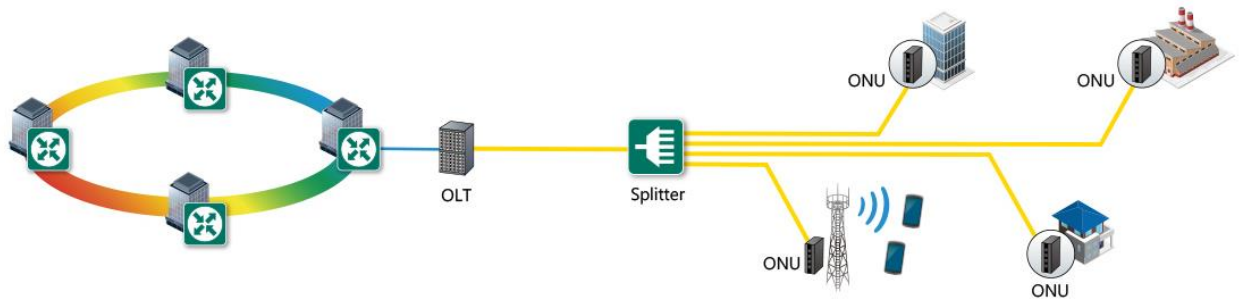


Рисунок 3.1 – Технологія PON

### 3.1 APON

APON (ATM Passive Optical Network) – це перша реалізація пасивної оптичної мережі, що ґрунтується на технології мультиплексування з часовим поділом (TDM) та асинхронному протоколі ATM. Стандарт APON було затверджено у 1998 році в рамках рекомендації ITU-T G.983.1. У початкових варіантах мережі застосовувалися комірки ATM для передачі всіх типів трафіку, що робило цю технологію привабливою для великих корпоративних клієнтів.

Мережі APON забезпечують два режими передачі: симетричний (155,52 Мбіт/с в обох напрямках) та асиметричний (622,08 Мбіт/с на низхідному каналі та 155,52 Мбіт/с на висхідному). У пізніших реалізаціях швидкість низхідного потоку була збільшена до 1244,16 Мбіт/с. Одне оптичне волокно від OLT (Оптичного лінійного терміналу) через спліттер може обслуговувати до 32 користувачів. Обов'язковим елементом у таких мережах є підтримка QoS (Quality of Service), що гарантує якість обслуговування різних типів трафіку.

### 3.2 BPON

BPON (Broadband Passive Optical Network) є розширеною версією APON, яка зберігає використання ATM-протоколу, але включає підтримку широкосмугових мультимедійних послуг, зокрема телебачення (CATV

overlay). Стандарт BPON був затверджений у 2001 році як рекомендація ІТУ-Т G.983.3. BPON підтримує передачу голосу, даних та відео по окремих довжинах хвиль: 1480–1500 нм для низхідного трафіку, 1260–1360 нм для висхідного та 1550 нм для телевізійного сигналу. Додатково реалізовано підтримку хвильового мультиплексування (WDM) і динамічного розподілу смуги пропускання, що дозволяє ефективніше управляти мережею при одночасному підключенні до 32 абонентів.

### 3.3 GPON

GPON (Gigabit Passive Optical Network) – це подальший розвиток технологій PON, який замінив АТМ-протокол на більш ефективний метод інкапсуляції GEM (GPON Encapsulation Method), зберігаючи сумісність із попередніми стандартами (APON, BPON). GPON стандартизовано у 2003 році в рамках рекомендації ІТУ-Т G.984.1.

GPON дозволяє досягати швидкостей передачі до 2,5 Гбіт/с у низхідному каналі та до 1,25 Гбіт/с у висхідному (із варіантами симетричного режиму).

Мережа підтримує резервування, що дозволяє дублювати волокно або обладнання, забезпечуючи високу надійність. Канали розділяються за допомогою WDM, а мультиплексування здійснюється з фіксованим часовим інтервалом (125 мкс), що наближає GPON до концепцій пакетної комутації (як у Ethernet/IP-мережах). Розподіл пропускну здатності здійснюється або за запитом від ONT/ONU, або централізовано з боку OLT.

### 3.4 EPON

EPON (Ethernet Passive Optical Network), стандартизована IEEE у 2004 році (802.3ah), є реалізацією пасивної оптичної мережі, яка використовує стандартні Ethernet-кадри для передачі даних.

Вона орієнтована на інтеграцію з Ethernet-мережами (LAN), що спрощує впровадження в існуючу інфраструктуру.

EPON підтримує симетричну швидкість 1 Гбіт/с на довжинах хвиль 1490 нм (низхідний) і 1310 нм (висхідний). Стандарт допускає підключення до 32 абонентських пристроїв до одного OLT. Існують варіанти 1000BASE-PX10 і 1000BASE-PX20, що дозволяють досягати відстаней 10 і 20 км відповідно. Хоча CATV-трансляція не є частиною базового стандарту, вона реалізується через додаткову довжину хвилі 1550 нм.

### 3.5 WDM-PON

Wave Division Multiplexing Passive Optical Network – це пасивна оптична мережа, яка забезпечує логічну топологію «точка-точка», залишаючись фізично спільною мережею [7].

Її головною особливістю є використання окремої довжини хвилі для кожного абонента, завдяки чому кожен користувач отримує індивідуальний канал зв'язку. Це досягається за допомогою спеціального фільтра – AWG (Arrayed Waveguide Grating), який виконує функцію розділення спектру замість звичайного оптичного спліттера, як у GPON чи EPON.

Архітектурно WDM-PON схожа на інші FTTx-рішення, зокрема EPON, GPON або їхні 10-гігабітні варіанти, однак її принцип роботи суттєво відрізняється.

Завдяки виділеній довжині хвилі для кожного абонента забезпечується повна відсутність перешкод у низхідному напрямку, а також підвищена безпека та кращий контроль за якістю обслуговування. Такий підхід також дає змогу гарантувати повноцінну пропускну здатність кожному користувачу, що особливо важливо для сучасних сервісів із високими вимогами до швидкості та стабільності. Незважаючи на переваги, технологія має й суттєві недоліки. Насамперед це висока вартість, пов'язана з необхідністю індивідуального трансивера для кожного абонента на стороні

центрального термінала OLT. Додатково вартість зростає через використання AWG-фільтра, який значно дорожчий за традиційні спліттери. Окрім цього, технологія вважається менш зрілою порівняно з іншими рішеннями PON і потребує точного температурного контролю для стабільної роботи спектрального розділення.

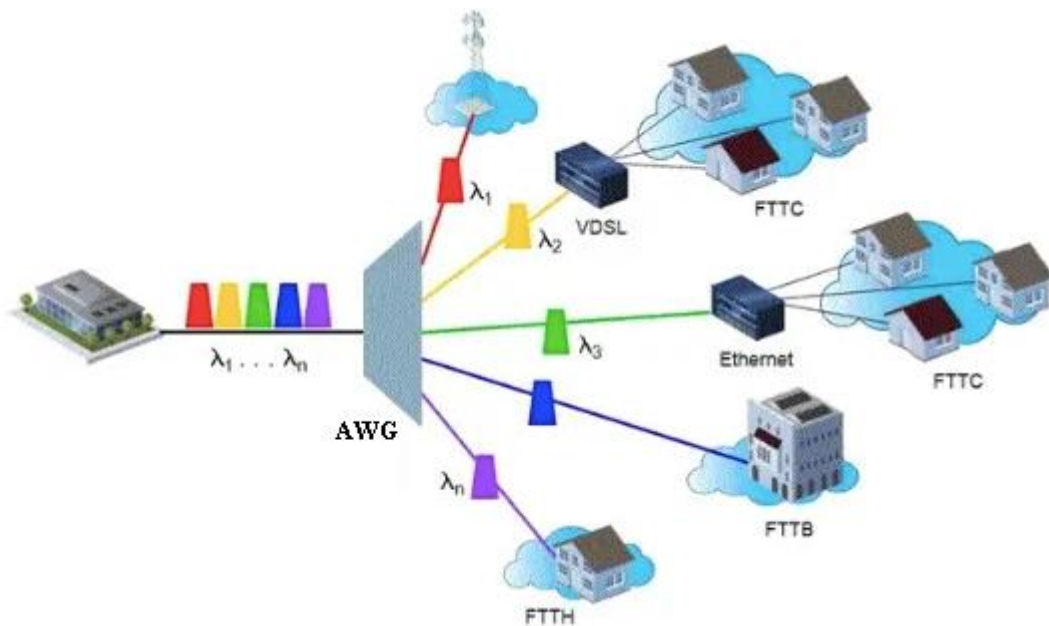


Рисунок 3.2 – Технологія WDM-PON

Очікується, що в майбутньому WDM-PON отримає ширше впровадження, особливо в сегментах з високими вимогами до конфіденційності, продуктивності та керованості, хоча сьогодні її застосування ще обмежене через складність і високу вартість реалізації.

## 4 ПРОЄКТ МЕРЕЖІ WDM-PON

### 4.1 Розташування мережі

Село Золоті Пруди – мальовниче поселення, розташоване приблизно за 25 км на північ від міста Лиман, на межі заповідної території Святі Гори. Населений пункт налічує близько 273 житлових будинків, з прогнозованою кількістю користувачів – 125 (рисунок 4.1).

Під час проєктування оптичної мережі важливо враховувати потенціал зростання числа абонентів. Це означає, що інфраструктура повинна бути побудована з урахуванням резервної пропускної здатності та можливості масштабування.

Оптимальним рішенням стане використання пасивної оптичної мережі з урахуванням сучасних стандартів, таких як GPON або XGS-PON, які дозволяють обслуговувати більше користувачів без необхідності значної модернізації обладнання в майбутньому.

Також доцільно передбачити гнучкість у структурі мережі, щоб у разі забудови нових ділянок була можливість швидко і з мінімальними витратами підключити додаткових абонентів. Це забезпечить надійність і довготривалу ефективність мережі в умовах зростаючих потреб населеного пункту.

У рамках проєкту впроваджується мережа типу WDM-PON із використанням каскадного з'єднання оптичних сплітерів та безтемпературного фільтра A-AWG (Athermal Arrayed Waveguide Grating). Така архітектура дозволяє створити гнучку та масштабовану інфраструктуру з високим рівнем розмежування каналів між абонентами, що значно підвищує безпеку та стабільність з'єднання.

Наразі в селі Золоті Пруди доступ до Інтернету надається кількома провайдерами, переважно через застарілі технології ADSL і локальні точки Wi-Fi-доступу. Максимальна швидкість таких з'єднань не перевищує 8

Мбіт/с, що не відповідає сучасним вимогам користувачів. Основним завданням проєкту є забезпечення мешканців справжнім широкосмуговим інтернетом із високою швидкістю передачі даних, мінімальними затримками та можливістю масштабування.



Рисунок 4.1 – Місце розташування мережі WDM-PON

Оскільки оптична інфраструктура в селі відсутня, вона проєктується «з нуля». Для ефективного прокладання мережі та оптимізації розподілу ресурсу, територія села поділена на чотири зони – окремі гілки майбутньої оптичної мережі. Кожна з гілок відповідає за обслуговування певної частини населеного пункту.

Такий підхід дозволяє рівномірно розподілити навантаження, спростити технічне обслуговування та забезпечити резерви під подальшу розбудову (рисунок 4.2).

Передбачена структура WDM-PON дозволяє забезпечити кожного абонента виділеним оптичним каналом, уникаючи взаємних перешкод, що характерні для традиційних PON-систем із поділом часу. У поєднанні з використанням А-AWG фільтрів це забезпечує високу якість зв'язку навіть при значному збільшенні кількості користувачів у майбутньому.

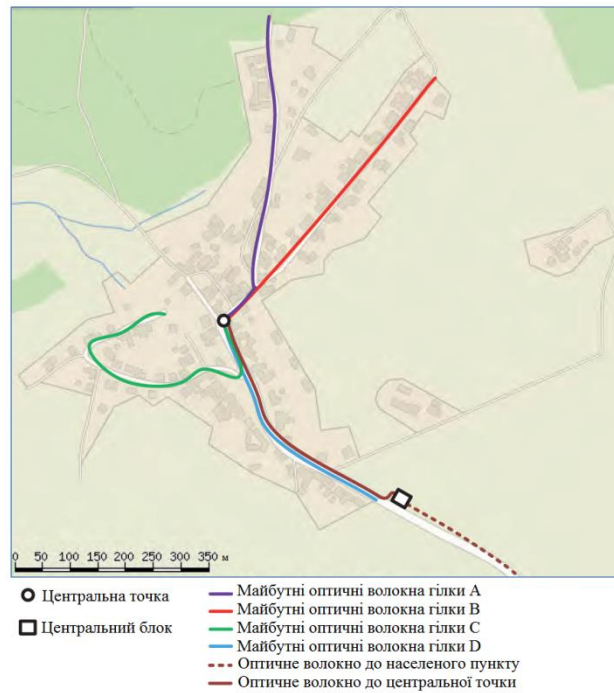


Рисунок 5.2 – Майбутні оптичні шляхи

#### 4.2 Технологія побудови оптичних трас

Конструкція оптичної мережі у селі Золоті Пруди розроблена з урахуванням географічних та інфраструктурних особливостей місцевості, що дозволяє забезпечити надійність, гнучкість та можливість масштабування мережі. Як основу обрано технологію захисних протекторів із поліетилену високої щільності (ПВЩ), в які будуть вдуватися мікротрубки, а в них – оптичні мікрволокна або мікрокабелі для кінцевих користувачів. Такий підхід дозволяє оперативно та з мінімальними витратами виконувати майбутнє розширення мережі.

Під час монтажу передбачено використання протекторів ПВЩ із діаметрами 40/33 мм, 32/27 мм та 25/21 мм, що забезпечує фізичну захищеність та достатній внутрішній простір для мікротрубок. Як транспортний середовищем служитиме оптичний мікрокабель типу DROP AIRBLOWN, який включає два одномодових волокна SM 9/125, G.652 D: одне волокно використовується для передачі сигналу, друге – резервне для забезпечення надійності або подальших послуг.

Основна оптична траса прокладається вздовж дороги, на глибині 0,8 м. У шести місцях, де потрібно перетнути дорогу, застосовується метод горизонтально-направленого буріння (ГНБ), що дає змогу прокласти комунікації без розкопування асфальтового покриття та без порушення дорожнього руху. Усі захисні труби ПВЩ в ґрунті будуть промарковані сигнальною фольгою помаранчевого кольору з зазначенням власника для спрощення ідентифікації під час майбутніх робіт (рисунок 4.3).

У ключових точках мережі будуть розміщені розподільні щити типу MICOS ORM 96 SIS ZK (позначені як R2 та R3), у яких розташовуються первинні сплітери та фільтри A-AWG (виробник LG-Nortel, модель WPF 1132c). Ці щити забезпечать поділ сигналу за довжинами хвиль та подальше направлення до конкретних абонентів. Центральний вузол (R1), розташований біля головного оптичного кабелю, міститиме основний активний елемент – OLT-блок, що відповідає обраній архітектурі WDM-PON та координує взаємодію з усією мережею.

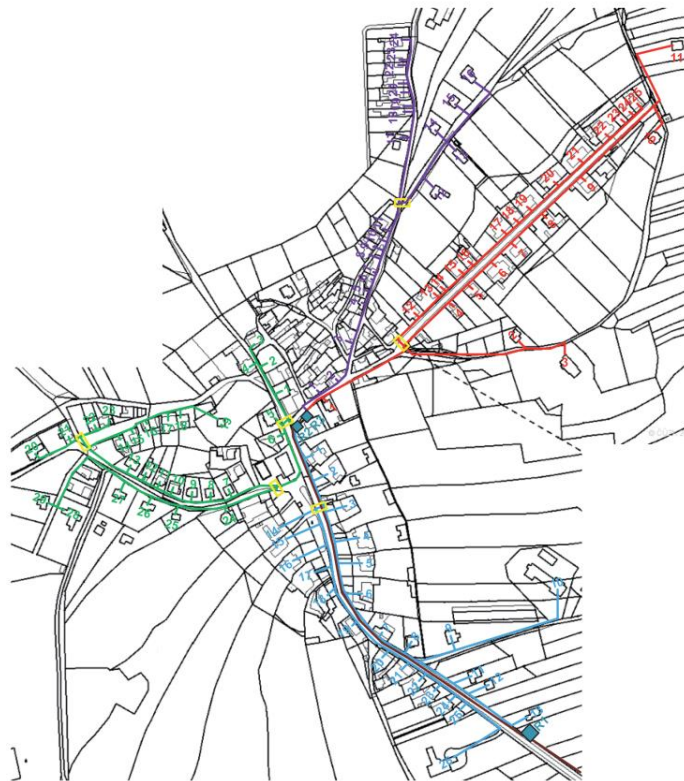


Рисунок 4.3 –Топографія прокладки оптичних трас

Запропонована технологія використання мікротрубок у поєднанні з оптичними мікрОВОлокнами є ефективним і гнучким підходом для побудови сучасної волоконно-оптичної мережі.

Мікротрубки значно підвищують адаптивність та масштабованість інфраструктури. Завдяки тому, що мікрОВОлокна вдуваються в трубки лише за потреби, можливо оптимізувати початкові інвестиції в проєкт, поступово вводячи в експлуатацію нові ресурси лише у міру зростання попиту на послуги.

Усі мікротрубки прокладаються всередині захисного кожуха з ПВЩ, що забезпечує додаткову механічну та погодну стійкість. Для розгалуження окремої мікротрубки до абонентського об'єкта використовується спеціальна водонепроникна Т-муфта.

Вона дозволяє акуратно та герметично відвести одну мікротрубку, залишаючи решту цілком інтактними, що зберігає безперервність і захищеність основного каналу.

Для уникнення плутанини всі мікротрубки виготовляються в різних кольорах із прикріпленими етикетками, що забезпечує швидку ідентифікацію під час монтажу та обслуговування. Колірна гама трубок підібрана з урахуванням високої контрастності між відтінками, що значно полегшує візуальну диференціацію навіть у складних умовах монтажу.

Ця технологічна схема не лише підтримує принцип модульності та розширюваності, але й забезпечує високу надійність експлуатації впродовж тривалого часу. Схема розподілу мікротрубок, представлена на рисунку 4.4, відображає логіку побудови мережі, а також взаємозв'язки між основними і розподільними сегментами.

У розподільній шафі R1, що містить центральну станцію, передбачено щонайменше 10 метрів кабельного запасу основного оптичного кабелю. Цей запас необхідний для зручного монтажу, обслуговування та можливих подальших змін у конфігурації мережі. Після заведення кабелю до оптичного блоку проводиться його розгортання, і оптичні волокна зварюються з

патчкордами, оснащеними роз'ємами типу SC/APC. Таке з'єднання забезпечує надійний і стандартизований інтерфейс для подальшого підключення.

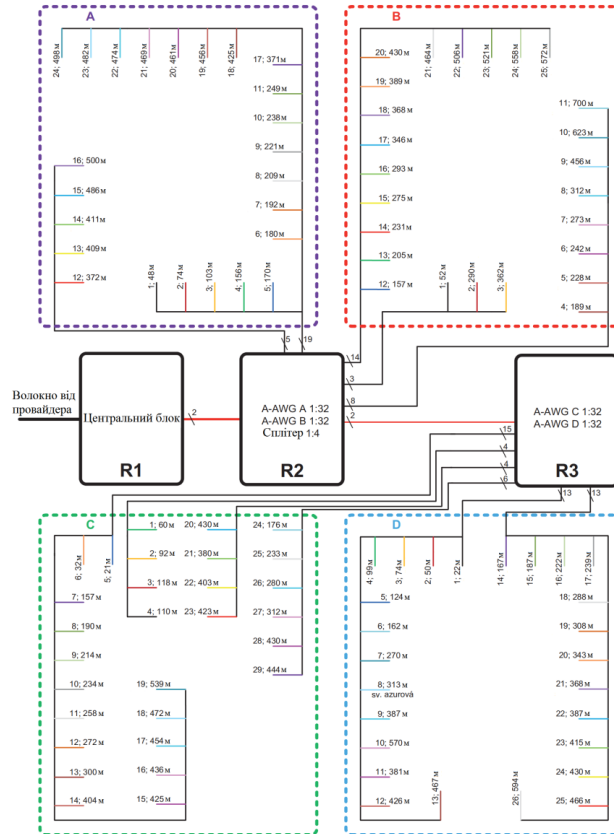


Рисунок 4.4 – Схематичний розподіл мікротрубок

Основний оптичний кабель прокладається до розподільної шафи R2, де сигнал розгалужується за допомогою оптичного сплітера типу 1:4 та передається на пристрої A-AWG (Athermal Arrayed Waveguide Grating), які виконують функцію мультиплексора/демультиплексора.

Цей розподіл дозволяє призначити окрему довжину хвилі кожному абоненту, забезпечуючи одночасний, високошвидкісний і незалежний доступ.

У двох розподільних щитах ORM 96 SIS буде можливість розмістити до 96 роз'ємів. Кожен щит буде оснащено чотирма модулями A-AWG та одним оптичним сплітером. Крім того, в щитах передбачено зберігання до 6

метрів запасу для кожного оптичного волокна, що забезпечує достатній ресурс для обслуговування, ремонту або перепідключення. Оптичні касети, вмонтовані у щити, служать для організації зварних швів між магістральними волокнами і патчкордами з роз'ємами SC/APC, які підключаються до відповідних портів A-AWG. Така схема організації показана на рисунку 4.5 і забезпечує впорядковану, надійну та стандартизовану побудову WDM-PON мережі.

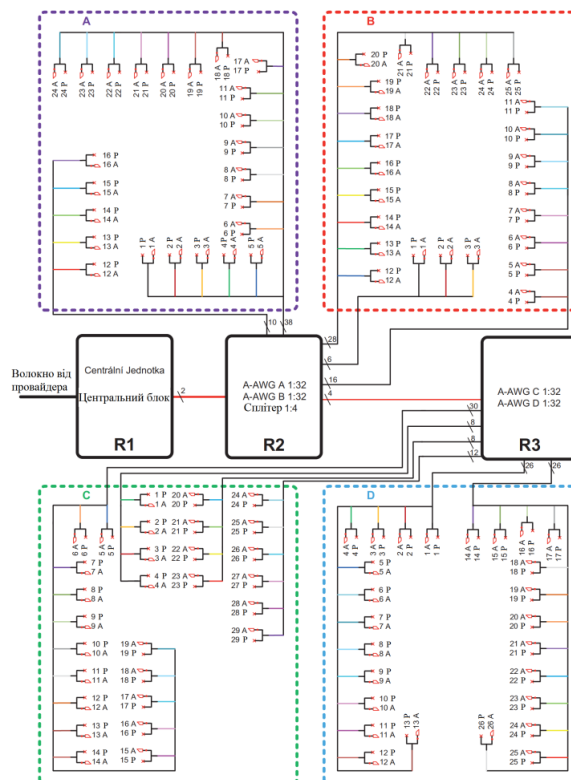


Рисунок 4.5 – Схема підключення оптичних волокон до ONT

На стороні клієнта, у вхідних зонах будинків, буде встановлено настінний оптичний розподільний щит типу ORM2 виробництва MICOS. До цього щита оптичний кабель буде підведено всередині мікротрубки, після чого кабель розкривається, і технологічне волокно з'єднується з оптичним патчкордом, оснащеним роз'ємом SC/APC, шляхом зварювання. Такий підхід забезпечує компактне, захищене і стандартизоване з'єднання для подальшого підключення абонентського обладнання (рисунок 4.6).

Маршрут від розподільного щита до абонентського терміналу буде реалізовано кабелем для внутрішнього використання з вогнезахисною оболонкою. Це дозволить безпечно прокладати кабель усередині приміщень відповідно до будівельних норм та вимог протипожежної безпеки. Така структура забезпечує гнучкість, легкість обслуговування та готовність до подальшого розширення мережі, зберігаючи при цьому високий рівень надійності та якості з'єднання.

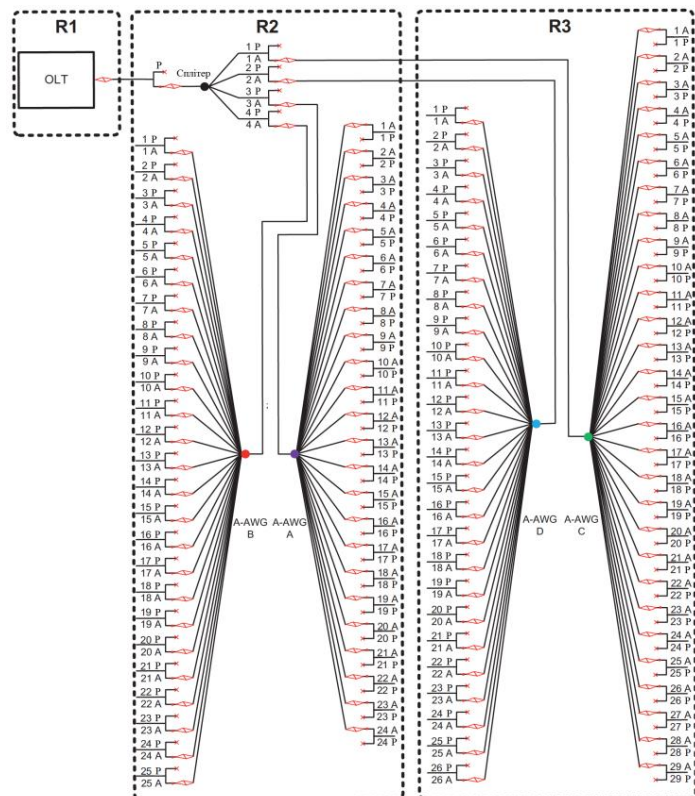


Рисунок 4.6 –Схема підключення волокон в розподільних шафах

### 4.3 Використана технологія

Мережа буде побудована на основі пасивних оптичних елементів, включаючи оптичний сплітер і мультиплексори/демультиплексори типу А-АWG, що визначає її як пасивну оптичну мережу WDM-PON. Архітектура передбачає каскадне з'єднання сплітера та А-АWG, що дозволяє ефективно розподіляти сигнал до кінцевих користувачів. Топологія мережі,

представлена на рисунку 4.7, реалізована за концепцією FTTH (Fiber to the Home), що є оптимальним варіантом для сільської забудови, яка в основному складається з окремих приватних будинків.

У системі буде використовуватись щільний хвильовий мультиплексор DWDM із растром 100 ГГц (0,8 нм між каналами), що дозволяє максимально ефективно використовувати спектр і підтримувати велику кількість каналів на одному волокні.

Це забезпечує не лише високу пропускну здатність, але й підтримку сучасних мультимедійних послуг, зокрема Triple Play (інтернет, телебачення, телефонія).

Таким чином, мережа WDM-PON із використанням DWDM і FTTH стане високопродуктивним та масштабованим рішенням для надання широкопasmового доступу в селі Золоті Пруди.

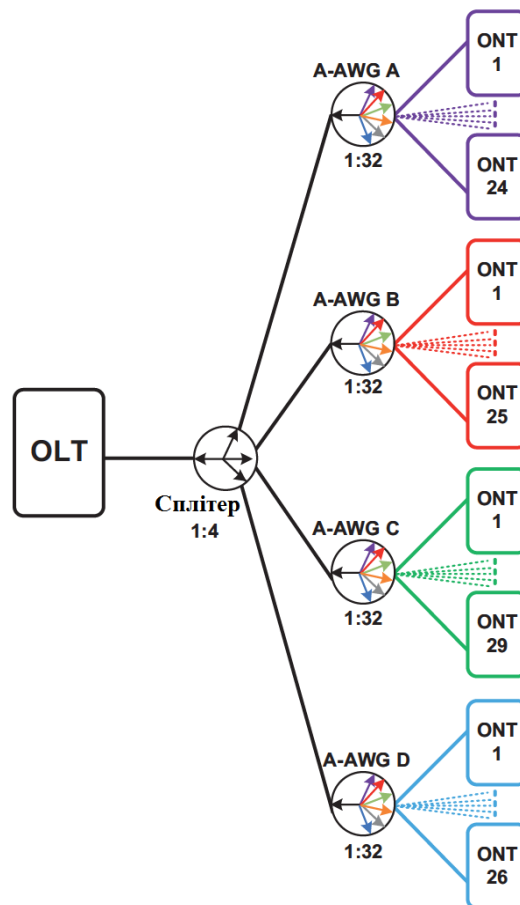


Рисунок 4.7 – Схема проектованої мережі

Оптичний термінал LG-Nortel EAST 1100 R5 OLT, який буде розміщений у зовнішній розподільній шафі R1, є ключовим елементом центральної станції в архітектурі WDM-PON (рисунок 4.8). Завдяки модульній конструкції пристрій легко адаптується до зміни навантаження та дозволяє поетапно розширювати мережу без значних витрат. EAST 1100 R5 забезпечує повну підтримку сервісів Triple Play – високошвидкісного інтернету, IP-телебачення та VoIP-зв'язку.

Основні модулі системи включають:

- MC – діагностичну карту для контролю та моніторингу стану системи;
- L2/L3 комутатори – два вбудовані комутатори, які забезпечують гнучке маршрутизування трафіку та VLAN-обробку;
- 8 слотів для PIU – модульні картки для підключення до абонентських пристроїв.

У запропонованій конфігурації:

- встановлюється одна діагностична карта MC;
- використовується центральний комутатор із пропускною здатністю 240 Гбіт/с;
- передбачено чотири картки PIU, кожна з яких підтримує 32 оптичні канали зі швидкістю передачі 100 Мбіт/с (загалом 128 каналів);
- модулі PIU забезпечують інтерфейси WDM PON, відповідні для архітектури села.

При використанні оптичної панелі управління OLT EAST 1100 R5, мережа отримує централізоване управління, контроль навантаження та можливість віддаленого обслуговування. Це рішення ідеально поєднується з каскадною архітектурою на базі сплітерів та мультиплексорів A-AWG, що забезпечує високу масштабованість мережі та ефективне використання оптичного спектра.

Таким чином, EAST 1100 R5 стане надійною основою для створення сучасної високошвидкісної оптичної інфраструктури в селі Золоті Пруди.



Рисунок 4.8 – OLT LG-Nortel EAST 1100 R5

A-AWG (Athermal Arrayed Waveguide Grating) типу WPF 1132c – це пасивний оптичний компонент, що використовується для мультиплексування (об'єднання) та демуплексування (розділення) оптичних сигналів з різними довжинами хвиль у мережах WDM-PON. Його основне призначення – розділяти або з'єднувати окремі канали зв'язку, кожен з яких передається на своїй унікальній довжині хвилі.

Ключові особливості A-AWG WPF 1132c:

- атермальний – не потребує термостабілізації або зовнішнього живлення, що значно спрощує монтаж у зовнішніх пасивних розподільчих шафах (наприклад, R2, R3).
- пасивний пристрій – не має рухомих частин та електроніки, що забезпечує високу надійність і тривалий термін служби.
- мультиплексування/демультиплексування – пристрій розподіляє вхідний оптичний сигнал на канали з різними довжинами хвиль або об'єднує кілька таких сигналів в один оптичний потік.
- висока ізоляція між каналами – мінімізує взаємні перешкоди, що покращує якість з'єднання та безпеку передачі даних.
- сумісність із DWDM – пристрій підтримує щільну схему WDM із кроком між каналами 100 ГГц ( $\approx 0,8$  нм), що дає змогу ефективно використовувати спектр.

На рисунку 4.9 наведено приклад конструкції та принцип роботи A-AWG фільтра типу WPF 1132c, в якому чітко показані вхідна лінія, матриця хвилеводів і виходи для окремих довжин хвиль.

Цей пристрій є критично важливим у реалізації WDM-PON мережі, оскільки саме він дозволяє направляти сигнали з головної станції до конкретного абонента, ізольовано й ефективно.



Рисунок 4.9 – А-AWG WPF 1132с

LG-Nortel EARU 1112 (Ethernet Access) – це компактний абонентський термінал, розроблений для використання в мережах WDM-PON і призначений для інсталяції безпосередньо в житлових будинках (рисунок 4.10). Завдяки своїм технічним і функціональним характеристикам, цей пристрій забезпечує надійний доступ до високошвидкісного Інтернету та підтримує сучасні телекомунікаційні послуги.

Основні переваги LG-Nortel EARU 1112:

- простота та надійність: пристрій має мінімалістичний дизайн, потребує мінімального технічного обслуговування і забезпечує стабільну роботу навіть у складних умовах;
- низьке енергоспоживання: завдяки пасивному охолодженню та енергоефективним компонентам, підходить для тривалого використання у домашніх умовах;
- гнучкість встановлення: невеликі габарити та настінне/настільне кріплення дають змогу адаптувати монтаж до будь-якого інтер'єру;
- PON-інтерфейс + 4 порти Gigabit Ethernet: забезпечує підключення до оптичної мережі через один порт PON, а також можливість з'єднання до чотирьох локальних пристроїв на швидкості до 1 Гбіт/с;

- підтримка всього діапазону довжин хвиль: термінал сумісний із широким спектром довжин хвиль, що забезпечує універсальність і простоту інтеграції у WDM-середовище;

- QoS (Quality of Service): підтримка пріоритезації трафіку гарантує високу якість роботи для критично важливих сервісів, таких як VoIP, IPTV та онлайн-ігри;

- сумісність зі стандартами передачі даних: пристрій підтримує базові та розширені протоколи Ethernet, що дозволяє забезпечити надійне з'єднання з різними типами обладнання у мережі користувача.

LG-Nortel EARU 1112 є ідеальним рішенням для мереж FTTH, орієнтованих на масове підключення домашніх користувачів до швидкісного Інтернету, телефонії та телебачення в рамках концепції Triple Play.



Рисунок 4.10 – LG-Nortel EARU 1112

#### 4.4 Баланс оптичного бюджету

Баланс загасання мережі був визначений шляхом аналізу оптичного шляху до найвіддаленішого абонентського блоку в секторі В, який є критичним з точки зору втрат сигналу. Розрахунок включав лише пасивні елементи мережі (оптичні з'єднання, сплітери, фільтри А-AWG, зварні з'єднання тощо), оскільки втрати на ділянках робочого волокна були знехтувані через їх незначний вплив на загальний баланс.

На основі аналізу маршруту, зображеного на рисунку 4.11, підсумовані втрати склали:

Загальне ослаблення сигналу: 12,64 дБ. Цей показник знаходиться в межах допустимого порогу для технології WDM-PON і свідчить про правильність проектного підходу, а також про забезпечення якісного сигналу навіть для абонентів, розташованих на максимальній відстані від центральної станції.

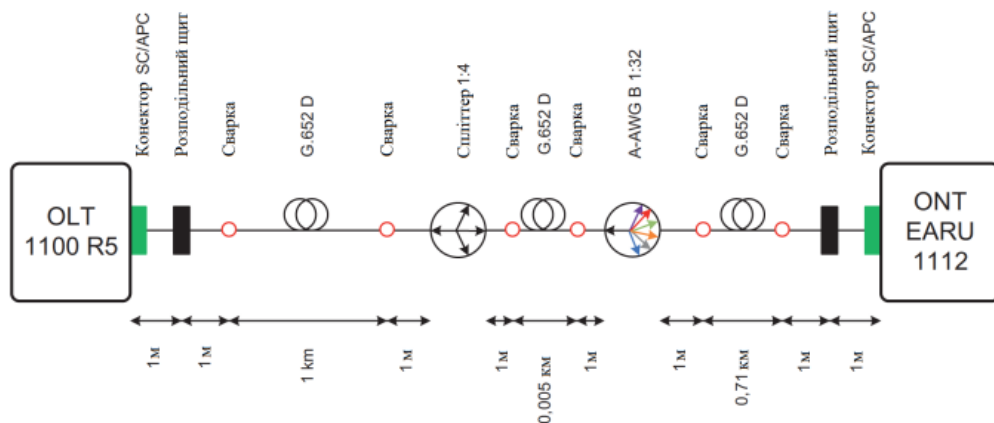


Рисунок 4.11 – Ослаблення сигналу в розподільчій мережі

Таблиця 4.1 – Аналіз ослаблення сигналу

Елемент	Специфікація кількість [шт]	Довжина [км]	Номінальне затухання [дБ]	Загальне затухання [дБ]
Конектор	SC/APC	2	0,20	0,40
Розподільний щит	2 конектори SC/APC	2	0,50	1,00
Сварка		6	0,05	0,30
Оптичне волокно	G.652 D	1,715	0,4	0,69
Спліттер	1:4	1	7,4	7,4
A-AWG B	1:32	1	2,1	2,1
Резерв	Старіння та термічна компенсація			0,75
Всього загасання на маршруті				12,64

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання випускної кваліфікаційної роботи було розроблено проєкт мультисервісної комп'ютерної мережі для невеликого населеного пункту. Особливу увагу приділено аналізу сучасних технологій побудови мультисервісних мереж та визначенню тенденцій їх подальшого розвитку.

За підсумками дослідження було прийнято рішення спроектувати мережу на основі технології WDM-PON, що зумовлено потенційним зростанням кількості користувачів у майбутньому.

Згідно з аналізом ринку телекомунікацій було підібрано обладнання для впровадження мультисервісної мережі у вибраному населеному пункті. Як станційне обладнання обрано OLT LG-Nortel EAST 1100 R5, що забезпечує створення надійної та якісної мережі на базі WDM-PON. У якості абонентських пристроїв запропоновано використовувати термінали LG-Nortel EARU 1112. Також було підібрано пасивне обладнання для реалізації топології типу «дерево».

Проєкт охоплює структурну схему мультисервісної мережі, план прокладки оптичного кабелю територією населеного пункту, схеми підключення обладнання, а також розрахунок оптичного бюджету.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Stallings W. Data and Computer Communications / W. Stallings. – Pearson Education, 2014. – 1023 p.
2. Forouzan B. Data Communications and Networking / B. Forouzan. – McGraw-Hill Company Inc., 2017. – 1187 p.
3. Falch, M.; Henten, A. Dimensions of Broadband Policies and Developments. Telecommun. Policy 2018, 42, 715–725.
4. G.983.1: Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks (PON). Available online: <https://bit.ly/2AZscPE>.
5. Jennings F. Practical data communications: modems, networks and protocols / F. Jennings. – Blackwell Scientific, 2019. – 318 p.
6. Li, C.; Guo, W.; Wang, W.; Hu, W.; Xia, M. Bandwidth Resource Sharing On The Xg-Pon Transmission Convergence Layer In A Multi-Operator Scenario. J. Opt. Commun. Netw. 2016, 8, 835–843.
7. Kaufmann M. Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition / M. Kaufmann – Elseiver, 2019. – 929 p.
8. Sahu P. Fundamentals of Optical Networks and Components / P. Sahu – CRC Press, 2020. – 388 p.
9. Peng-Jun Wan. Multichannel Optical Networks / Wan Peng-Jun – Springer, 2020. – 412 p.
10. Understand GPON Technology, Cisco. Electronic resource, 2021. Available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/switches/catalyst-pon-series/216230-understand-gpon-technology.pdf>.