

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань \_\_\_\_\_ 12 – Інформаційні технології \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 – Комп'ютерна інженерія \_\_\_\_\_

на тему «Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM»

КвРКІ. 170266.21.01.10 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-21-1

Керівник кандидат техн. наук, доцент  
Науковий ступінь, вчене звання

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри КІС, д.т.н., проф.

Т.О. Говорущенко  
11 05 2023 р.



Ідентифікація

Зверев С.С.  
Ініціали, прізвище



Ідентифікація

Іванов О.В.  
Ініціали, прізвище

Хмельницький – 2023

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Т.О.Говорущенко

« 01 » 09 2022 р.

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ)

Звереву Євгену Євгенійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM

Керівник проекту (роботи) Іванов О.В., к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 09.01.2023 р. № 1

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз відомих методів мультиплексування в оптичному кабелі




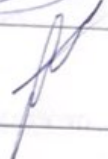
Моделювання комбінованих методів розробки нового методу мультиплексування

Метод мультиплексування, який буде забезпечувати значно більшу пропускну здатність і енергоефективність в порівнянні з існуючими методами

Відмінність WDM та TDM, переваги та недоліки кожної з них

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Лисенко С.М., професор кафедри КПС		
Антиплагіат	Нічепорук А.О., доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2022р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**


№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики ДРМ з керівником	01.09.2022	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2022	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2022	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2022	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2023	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2023	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2023	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2023	виконано
9	Попередній захист ДРМ	28.04.2023	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2023	

Студент

  
Підпис

Зверев Є.Є.  
Ініціали, прізвище

Керівник проекту (роботи)

  
Підпис

Іванов О.В.  
Ініціали, прізвище

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM.

Автор роботи: Зверев Є.Є., студент групи КІ2М-21-1.

Керівник роботи: Іванов О.В., кандидат техн. наук, доцент.

Пояснювальна записка: 79 с., 33 рис., 9 табл., 2 дод., 83 джерела.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: Мультиплексування; WDM; TDM; PON; Оптичне волокно; ВОК; ВОСП.

*Об'єктом дослідження* є процес передачі інформації через оптичне волоконне кабелю у волоконно-оптичних системах передачі.

*Предметом дослідження* є мультиплексування сигналу у волоконно-оптичному середовищі, особливості частотного розділення сигналу.

*Метою кваліфікаційної роботи* є аналіз методів та технологій мультиплексування та частотного розділення сигналів.

У дипломній роботі розглядаються основні характеристики передачі світлового сигналу в оптичному кабелі, проводиться аналіз основних методів мультиплексування та частотного розділення сигналу в оптичному кабелі, проводиться порівняння технологій WDM та PON. пропонується альтернативна модель системи мультиплексування.

*Наукова новизна отриманих результатів:*

1) Вперше було запропоновано використання принципу паралелізму в системах передачі інформації через оптичні волокна, що полягає у використанні кількох каналів передачі як одного;

2) Вперше було досягнуто максимально ефективного використання групового каналу передачі інформації, завдяки використанню динамічних вікон часу для користувачів.

*Практична значущість отриманих результатів* полягає у розробленні методу мультиплексування, який може бути застосований для магістральних ліній зв'язку, в разі збільшуючи пропускну здатність групового потоку в мережах.

## ЗМІСТ

<b>СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....</b>	<b>6</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>1 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕДАЧІ СВІТЛОВОГО СИГНАЛУ В ОПТОВОЛОКОННИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Передача інформації по волоконно-оптичних світловодах на основі фізичних принципів .....	10
1.2 Часовий розподіл.....	19
1.3 Метод частотної мультиплексації (FDM).....	20
1.3.1 Модове ущільнення .....	20
1.3.3 Розподіл бінарних потоків за часом.....	22
1.4 Технологія WDM.....	23
1.5 Аналіз волоконно-оптичних систем передач .....	24
1.6 Висновки до розділу .....	26
<b>2 ОСНОВНІ МЕТОДИ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ СИГНАЛІВ В ОПТИЧНИХ КАБЕЛЯХ.....</b>	<b>27</b>
2.1 Технології передачі даних: Ethernet, ATM та SDH .....	27
2.2 Технології передачі даних DWDM та CWDM.....	28
2.2.1 Порівняння WDM та TDM.....	34
2.3 PON (Passive Optical Network) – пасивна мережі доступу.....	37
2.3.1 APON .....	40
2.3.2 BPON .....	41
2.3.3 GPON .....	41
2.3.4 EPON .....	42

2.3.5 Приклад організації передачі даних у пасивних оптичних мережах з використанням технології GPON.....	43
2.4 Основні методи цифрового кодування .....	46
2.5 Висновки до розділу .....	48
<b>3 РОЗРОБКА АЛЬТЕРНАТИВНОГО МЕТОДУ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ</b> .....	50
3.1 Порівняння сучасних методів мультиплексування.....	50
3.2.1 Реалізація структурної схеми.....	57
3.3 Вимірювання та моніторинг .....	59
3.3.1 Характеристика оптичного моніторингу .....	59
3.3.2 Вимірювання параметрів оптичних компонентів за допомогою рефлектометрів .....	62
3.4 Висновки до розділу .....	67
<b>4 МАЙБУТНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЇ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ В ОПТИЧНИХ КАБЕЛЯХ.....</b>	69
4.1 Аналіз ефективності застосування мультиплексування в оптичних кабелях PON та WDM .....	69
4.1.1 Швидкість передачі даних .....	69
4.2 Порівняння TDM і WDM у PON .....	72
4.3 Порівняння вартості архітектур та складності обладнання.....	78
4.4 Забезпечення надійного захисту програмного забезпечення від можливих надзвичайних ситуацій.....	81
4.5 Використання мультиплексування в мережах 5G .....	84
4.6 Висновки до розділу .....	85
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	87
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....</b>	89

<b>ДОДАТОК А.</b> Копія статті .....	98
<b>ДОДАТОК Б.</b> Презентація до захисту кваліфікаційної роботи .....	106

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

APC – (Angled Physical Contact) – Кутове фізичне з'єднання

APON - (Asynchronous Transfer Mode passive optical network) - Режим асинхронної передачі пасивної оптичної мережі

ATM - (Asynchronous Transfer Mode) — Асинхронний спосіб передачі даних

BPON ( Broadband passive optical network) – широкопasmтова пасивна оптична

мережа

EPON – (Ethernet passive optical network) – пасивна оптична мережа з використанням технології Ethernet

FPGA – (Field Programmable Gate Array) – Поле програмувального масиву

FTTx – (Fiber to the x) – оптичне волокно до точки X

GEM - (GPON Encapsulation Method) - Метод інкапсуляції GPON

GFP – (Generic Framing Protocol) - Загальний протокол формування

GPON – (Gigabit Ethernet Passive Optical Network) - Пасивна оптична мережа Gigabit Ethernet

IETF – (Internet Engineering Task Force) – Інженерна робоча група Інтернету

MAC – (Media Access Control) – Контроль доступу до носія

MIB – (Management Information Base) – Управлінська база даних

OLT - (Optical Line Terminal) – оптичний лінійний термінал

OMCI – (ONT Management and Control Interface) – Інтерфейс управління та контролю оптичного мережевого терміналу

ONT - (Optical Network Terminal) – оптичний мережевий термінал

ONU – (Optical Network Unit) – Оптична мережева одиниця

P2MP - (point-to-multipoint) – топологія типу точка-багатоточка

PLOAM – (Physical Layer Operations, Administration and Maintenance) – Операції

на фізичному рівні, адміністрування та обслуговування

PMD – (physical medium dependent) – Залежний від фізичного середовища

передачі

PON - (passive optical network) – пасивна оптична мережа

SDH - (Synchronous Digital Hierarchy) – синхронна цифрова ієрархія

SONET – (Synchronous optical network) – Синхронна оптична мережа

TDM – (Time Division Multiplexing) - мультиплексування з часовим поділом

VLAN – (Virtual Local Area Network) – Віртуальна локальна мережа

АВОСП - аналогові волоконно-оптичні системи передачі

ВОЛЗ - волоконно-оптична лінія зв'язку

ВОСП – волоконно-оптичні системи передачі

Гц – герц

ДСВ – джерело оптичного випромінювання

ЕМХ – електромагнітні хвилі

КУО - каналотворювальне обладнання

ОАМ – (Operations Administration and Maintenance) - управління та обслуговування операцій

ОВ – оптичне випромінювання

ОВ – оптичне волокно

ОПер – оптичний передавач

ОПр – оптичний приймач

ОР – оптичний ретранслятор

ОС – обладнання сполучення

ПОМ – передавальний оптичний модуль

ПП – погоджуючий пристрій

ПРОМ - приймальний оптичний модуль

ЦВОСП - цифрові волоконно-оптичні системи передачі

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Телекомунікації є однією з найбільш швидко розвиваючих галузей нашого життя. Системи передачі інформації на сьогодні стали невід'ємною частиною як бізнесу та економіки, так і побутового рівня. Основні вимоги до таких систем полягають у високій швидкості та надійності передачі інформації. Засновані на використанні оптичних волоконних світловодів, оптичні лінії зв'язку є важливою складовою сучасних телекомунікаційних систем. Оптичні кабелі зв'язку мають значні переваги порівняно з мідними кабелями та радіозв'язком, такі як висока пропускна здатність, захищеність від зовнішніх електромагнітних полів, низькі втрати, малі габарити та маса, висока економічність. З метою ефективного використання ресурсів та максимального використання потенціалу оптоволоконних ліній передачі інформації, дослідження методів та технологій мультиплексування сигналу стає все більш актуальним.

*Мета* цього дослідження полягає у вивченні особливостей середовища передачі даних по оптичних кабелях, а також різних методів та технологій, що використовуються для мультиплексування та розділення сигналів за частотою.

Для того, щоб було досягнута поставлена мета необхідно було вирішити такі задачі:

- необхідно проаналізувати особливості та параметри методів мультиплексування та частотного розділення сигналів в оптоволоконних кабелях;
- проаналізувати явища, які мають вплив на передачу даних;
- оцінити методи та технології мультиплексування та частотного розділення сигналів і провести порівняння існуючих систем мультиплексування, виокремивши їх переваги та недоліки;
- розробити структурну схему альтернативного методу мультиплексування та частотного розділення сигналу в оптичному кабелі.

*Об'єкт дослідження* є процес передачі даних через оптичний кабель у волоконно-оптичних системах передачі.

*Предмет дослідження* є мультиплексування сигналів та особливостей їх частотного розділення в оптоволоконному середовищі.

*Наукова новизна одержаних результатів:*

- пропонується застосування принципу паралелізму в передачі інформації в волоконно-оптичних системах, що включає використання кількох каналів передачі як одного;

- новаторським рішенням стало досягнення максимально ефективного використання групового каналу передачі інформації завдяки застосуванню динамічних вікон часу для користувачів.

*Практичне значення одержаних результатів* полягає у розробці методу мультиплексування може використовуватись як для магістральних ліній зв'язку, так і для створення повноцінних оптоволоконних мереж зі значним підвищенням пропускної здатності групового потоку.

# 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕДАЧІ СВІТЛОВОГО СИГНАЛУ В ОПТОВОЛОКОННИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Передача інформації по волоконно-оптичних світловодах на основі фізичних принципів

За останні роки спостерігається швидкий розвиток оптичних інформаційних технологій, що призводить до зростання об'ємів трафіку, що передається по лініях зв'язку. Це вимагає збільшення пропускної здатності мереж зв'язку, але реалізація нових волоконно-оптичних ліній зв'язку потребує значних витрат. Розробка та впровадження нових технологій вже прокладених оптичних кабелів дозволяє максимально використовувати їх ємність та зменшує терміни та витрати на реалізацію проектів.

Електромагнітна хвиля - це коливання електромагнітного поля, яке змінюється в часі та розповсюджується у просторі. Відповідно до їх частотного спектра, електромагнітні хвилі можна розподілити на різні діапазони частот (показано у Таблиці 1.1) [7, с. 26].

Таблиця 1.1 – Різновиди електромагнітного випромінювання та їх частотні діапазони.

Випромінювання	Частотний діапазон
Гамма-випромінювання	$<0,0012$ нм
Ультрафіолетове випромінювання	$12$ нм ÷ $380$ нм
Видиме випромінювання	$380$ нм ÷ $760$ нм
Інфрачервоне випромінювання	$760$ нм ÷ $1$ мм
Радіохвилі	$>1$ мм

Основні кольори в видимому діапазоні мають такі довжини хвиль: фіолетовий - від 380 нм до 455 нм, блакитний - від 455 нм до 492 нм, зелений - від 492 нм до 577 нм, жовтий та жовтогарячий - від 577 нм до 622 нм, червоний - від 622 нм до 760 нм. А волоконна оптика використовує ближній діапазон інфрачервоного спектру випромінювання, який знаходиться в межах від 800 нм до 1700 нм [20, с. 51].

Щодо ефекту повного внутрішнього відбиття (ПВВ), він є ключовим механізмом передачі світла по волоконних світловодах [46, с. 218]. Цей ефект полягає в тому, що при падінні світлового променя на границю розділу середовищ з різною оптичною щільністю під певним кутом (критичним кутом), промінь повністю відбивається від границі розділу середовищ, і не проникає в інше середовище. Це забезпечує передачу світла на великі відстані без значного зменшення інтенсивності світла [22, с. 150].

Із закону Снеліуса випливає, що відношення синуса кута променя, що падає на границю розділу середовищ з різною оптичною щільністю, до синуса кута променя, що проходить в інше середовище (заломлюється), дорівнює відношенню показників заломлення цих середовищ, як показано на рис. 1.1. Це важливе фізичне правило забезпечує збереження імпульсу світла при проходженні через границю розділу середовищ [3, с. 49].

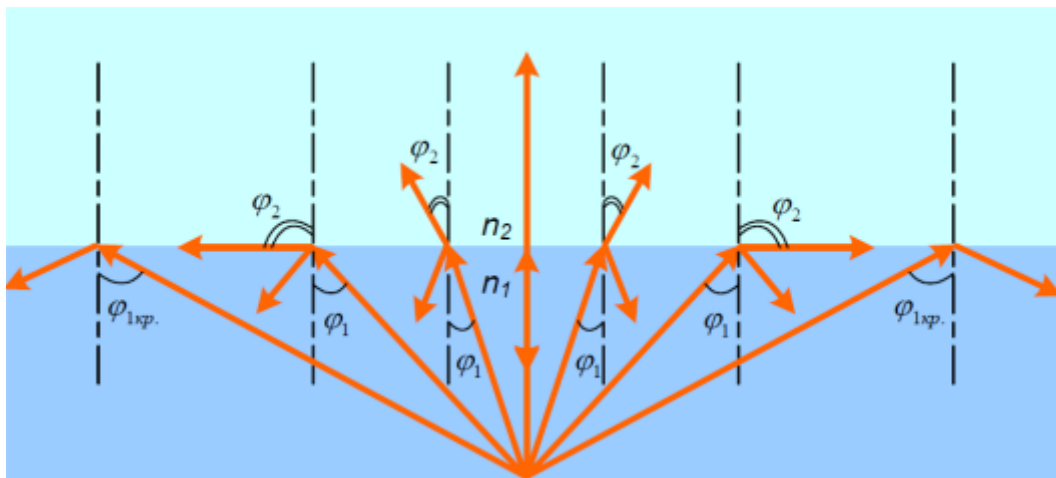


Рисунок 1.1 – Приклад повного внутрішнього відбиття

Для волоконної оптики використовуються світловоди зі складною структурою, що забезпечує зменшення втрат світла і збереження інтенсивності світла на великих відстанях [5, с. 54]. Волоконні світловоди здатні передавати сигнали на відстані до кількох сотень кілометрів з мінімальними втратами сигналу, що робить їх незамінними для багатьох технологій, включаючи телекомунікації, медицину, промисловість, аерокосмічну техніку та інші галузі [18, с. 34].

Показник заломлення - це важлива оптична характеристика матеріалу, що відображає співвідношення фазової швидкості електромагнітної хвилі у середовищі до швидкості світла у вакуумі [8, с. 38]. Цей показник впливає на поведінку світла під час проходження через різні матеріали, а також на ефективність елементів оптичної системи, таких як лінзи та призми. Для фазової швидкості електромагнітних хвиль використовується формула:

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{(\varepsilon \cdot \mu)}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu_r \cdot \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}} = \frac{c}{n}, \quad (1.1)$$

де:

$\varepsilon_r \cdot \mu_r$  - відносна діелектрична проникність середовища;

$\mu_r$  - відносна магнітна проникність;

$\varepsilon_0$  - діелектрична проникність вакууму;

$\mu_0$  - магнітна проникність вакууму;

$c$  – швидкість світла у вакуумі;

$n$  – показник заломлення.

Отже, маємо:  $n = \frac{c}{\vartheta}$ .

Матеріали можуть мати різний показник заломлення, який залежить від параметрів середовища, таких як довжина хвилі світла, температура і тиск. Наприклад, для води при 20 градусах С, показник заломлення для довжини хвилі 404,7 нм становить 1,3428, а для довжини хвилі 678,0 нм - 1,3308. В оптичному волокні показник заломлення серцевини повинен бути більшим від показника заломлення оболонки [73, с. 126]. Показник заломлення за радіальною віссю

світловода зображено на рис. 1.2 і називається профілем показника заломлення (ППЗ) [9, с. 33]. Крім того, добуток показника заломлення на геометричний шлях світлового променя називається оптичною довжиною шляху [64, с. 767]. Зі збільшенням температури, показник заломлення зменшується, але зміни цієї характеристики незначні (мільйонні долі на градус).

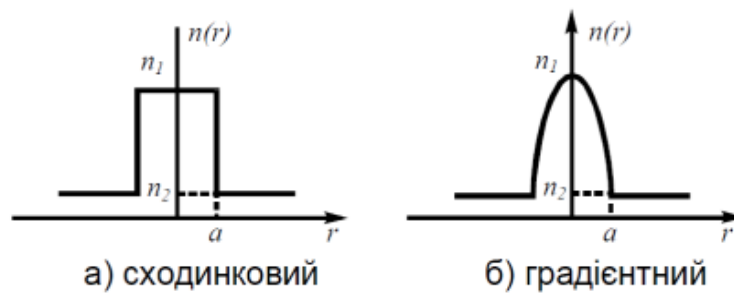


Рисунок 1.2 – Профіль показника заломлення (ППЗ) оптичного волокна

Хвильова електромагнітна теорія надає повний опис процесу передачі світла по волоконному світловоду (ВС) та вказує, що можуть поширюватись лише хвилі, які утворюють резонанс у поперечному перерізі ВС. Такі хвилі називають модами хвилеводу [36, с. 60]. Режим роботи ВС (одномодовий або багатомодовий) залежить від нормованої частоти  $v$ , що зображено на формулі:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{0.5}, \quad (1.2)$$

Де:

$\lambda$  – довжина хвилі випромінювання оптичного джерела;

$a$  – радіус серцевини ВС;

$n_1$  – Максимальне значення індексу заломлення у центральній частині волокна;

$n_2$  – показник заломлення в оболонці.

Якщо волокно має сходи́нковий профіль показника заломлення і  $0 < v < 2,4048$ , то воно розповсюджує світло в одномодовому режимі.

Багатомодовий режим передбачає розповсюдження сукупності мод, які введені у волокно під різними кутами з його торцевої поверхні. Типовими розмірами для багатомодових оптичних волокон є 50/125 мкм та 62,5/125 мкм [17, с. 84]. Градієнтний профіль показника заломлення часто використовується для зменшення міжмодової дисперсії в багатомодових волокнах. Локальні оптичні мережі є найбільш поширеною сферою застосування багатомодових оптичних волокон [82, с. 813].

Одномодові оптичні волокна, в яких на різних довжинах хвиль розповсюджується тільки одна мода, мають менший діаметр серцевини (від 7 до 9 мкм для діаметру серцевини при 125 мкм діаметрі оболонки). У наслідок цього, міжмодова дисперсія відсутня за одномодового режиму, що значно зменшує довжину регенераційної ділянки. Для багатомодових волокон, ефективність введення оптичного випромінювання у світловід характеризується апертурою оптичного волокна, яка має важливе значення [14, с. 98].

Щоб оцінити параметр ефективності введення оптичного випромінювання у світловід, використовують концепцію числової апертури. Для волокон зі сходячковим профілем показника заломлення цей параметр можна визначити за формулою:

$$NA = n_0 \cdot \sin \varphi \quad (1.3)$$

Ця формула - це формула числової апертури (NA), яка характеризує ефективну здатність оптичного волокна збирати та передавати світло [69, с. 567]. У цій формулі  $n_0$  представляє показник заломлення середовища, в якому проводяться виміри (для повітря за умов нормального тиску та температури 0 градусів Цельсія показник заломлення  $n_0 = 1,000297$ ), а « $\varphi$ » є кутом між віссю волокна та твірною конуса променів, що виходять з торця волокна на виході.

Апертурні характеристики волоконно-оптичного кабеля (ВОК) визначають максимальний кут  $\varphi$ , при якому світло зможе розповсюджуватись без втрат на випромінювання в зовнішнє середовище [70, с. 849]. Цей кут визначається

умовою повного внутрішнього відбиття на границі між серцевиною та оболонкою, як показано на рисунку 1.3.

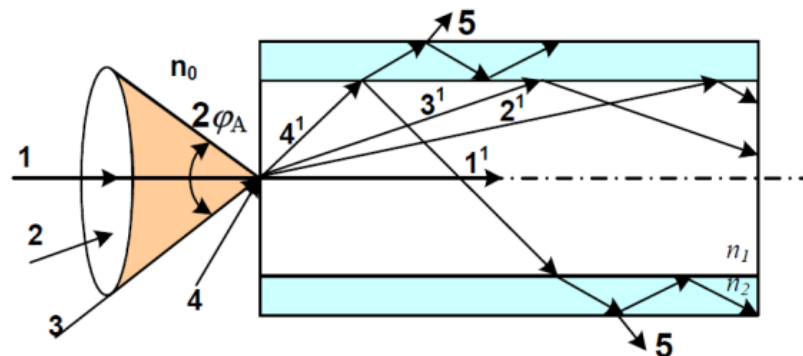


Рисунок 1.3 – Траєкторія світла в оптичному волокні при різних кутах падіння

Описано хід променів у світловоді з урахуванням кутів падіння. Вісь конуса співпадає з віссю оптичного волокна, а торець оптичного волокна перпендикулярний його осі. На рисунку зображені промені, що падають під різними кутами на торець світловоду, відбиваються від границі серцевина-оболонка та розповсюджуються у серцевині волокна. Промені, що відбиваються та розповсюджуються у серцевині волокна, називаються напрямленими модами, а промені, що заломлюються в оболонці та втрачають свою енергію, називаються витікаючими модами [42, с. 7]. При згині ВС, промінь, що заломлюється на границі серцевина-оболонка, також може стати частково витікаючою модою.

Під час передачі світла через оптичне волокно відбуваються втрати оптичної потужності, які можна умовно розділити на втрати у матеріалі волокна та втрати через недосконалість границі між серцевиною та оболонкою [2, с. 106]. Головні втрати в матеріалі волокна відбуваються через розсіювання та поглинання, причому розсіювання залежить від флуктуацій щільності і складу скла та порушень геометричної форми серцевини та оболонки. Розсіювання може бути Релеєвським, коли розмір неоднорідностей значно менший за довжину поширюваної хвилі, що зменшує його потужність пропорційно  $1/\lambda^4$  [33, с. 21].

Розглянемо деякі фізичні явища, які виникають через розсіювання Мі. Наприклад, зміна кольору неба від блакитного в зеніті до темного на обрії

пояснюється розсіюванням Мі. Також, непрозорість туману може бути наслідком сильного розсіювання Мі, а ослаблення світла Сонця на сході та заході значною мірою зумовлено розсіюванням Мі. У оптичних волокнах високої якості відсутні неоднорідності розмірів, що порівнюються з довжиною хвилі. Крім того, окрім Релеєвського та Мі розсіювань у оптичному волокні можуть виникати розсіювання, що обумовлені нелінійними ефектами, такі як вимушене розсіювання Рамана та вимушене розсіювання Мандельштама-Бріллюена [55, с. 700].

В матеріалах, таких як скло, втрати світла відбуваються через поглинання світла в самому матеріалі, а також через поглинання домішок у матеріалі. Це призводить до збільшення температури матеріалу через перетворення частини енергії світла на тепло [76, с. 39]. У кварцових світловодах лінії поглинання розташовані в ультрафіолетовій та інфрачервоній частині спектра, а не в діапазоні, який нас цікавить. Незважаючи на це, власне поглинання матеріалу дуже велике, що призводить до втрат світла навіть при досить низькому рівні витрат [49, с. 14].

Фундаментальні втрати в матеріалі світловоду визначаються власним поглинанням та Релеєвським розсіюванням на мікро-флуктуаціях щільності матеріалу.

Спектральна характеристика коефіцієнта загасання в кварцовому світловоді з низьким рівнем витрат показана на рис. 1.4, де області I, II та III є вікнами прозорості в матеріалі. Описані втрати енергії світла відбуваються в ультрафіолетовій та інфрачервоній областях спектра, але власне поглинання настільки велике, що це впливає на робочу область кварцових волокон. У певних областях спектра (820-860 нм, 1280-1330 нм, 1520-1580 нм) кварцовий світловід має вікна прозорості, де втрати енергії найменші.

Однак, власне поглинання настільки велике, що кінці смуг поглинання захоплюють робочу область кварцових волокон за досить низького рівня втрат [15, с. 38].

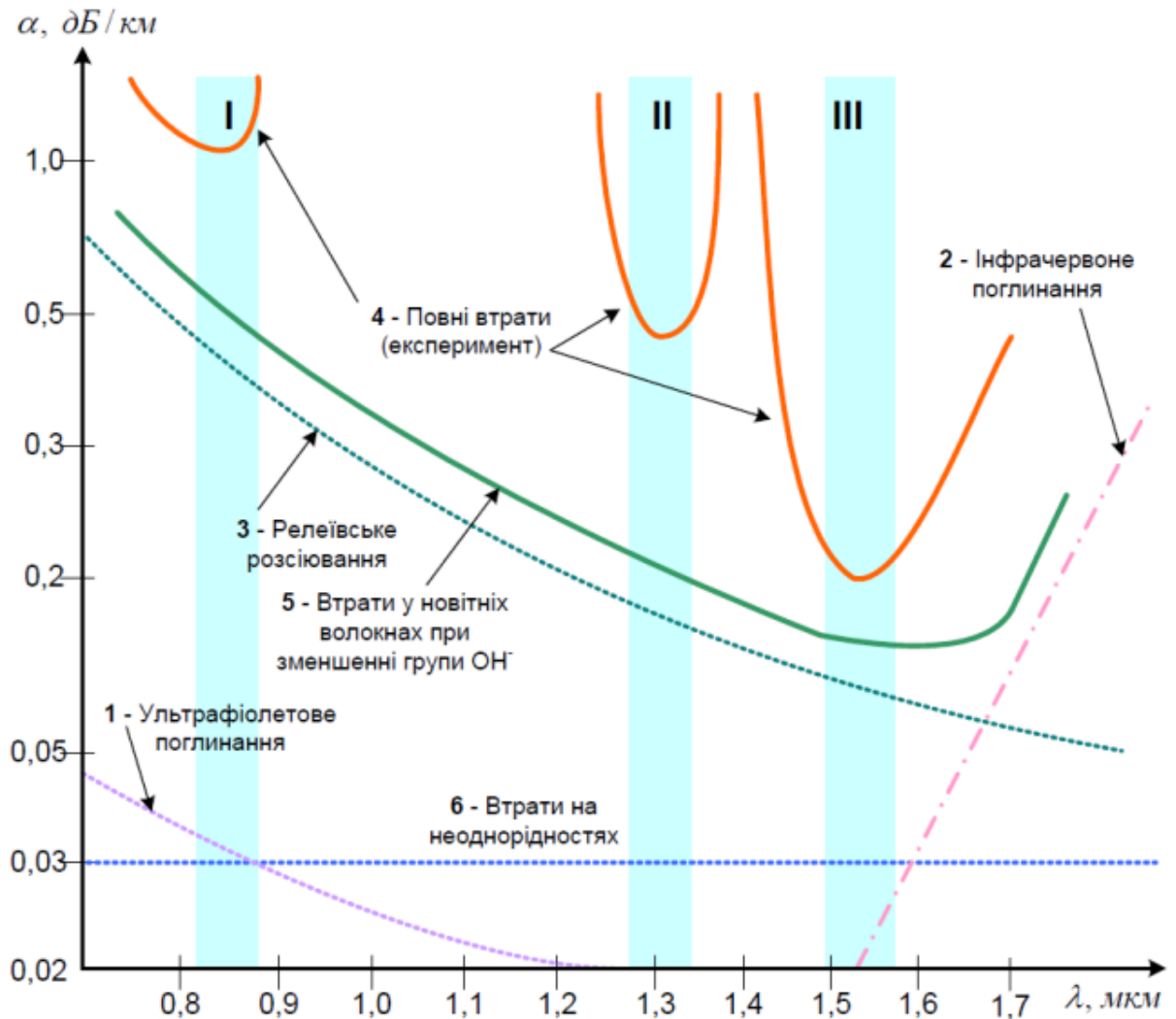


Рисунок 1.4 – Характеристика спектрального коефіцієнта зменшення сили сигналу в світловоді

У світловоді виникають втрати через наявність домішок, які можуть бути додані спеціально для отримання матеріалів з різними показниками заломлення. Це досягається введенням оксидів германію та фосфору для матеріалу серцевини та фтору чи оксиду бору для матеріалу оболонки волоконного світловоду. Однак, домішки бору не використовують, якщо волоконний світловод буде працювати на довжинах хвиль близько 1,55 мкм [65, с. 1227].

Щоб зменшити втрати, важливо також враховувати ультрафіолетове та інфрачервоне поглинання в матеріалі, а також Релеївське розсіювання. Крива 1 на графіку представляє ультрафіолетове поглинання, крива 2 – інфрачервоне поглинання, а крива 3 – Релеївське розсіювання.

Із домішок, які негативно впливають на оптичні волокна, особливо шкідливі водні та перехідні метали першої групи, такі як ванадій, хром, магній, залізо, кобальт та нікель [83, с. В489]. Довжина хвиль поглинання металевих домішок залежить від ступеня окислення іону металу. Концентрація домішок повинна бути меншою за  $10^{-9}$ , щоб забезпечити приріст поглинання менше 1 дБ/км.

Наявність іонів гідроксильної групи  $\text{OH}^-$ , які містяться в воді, може призвести до збільшення поглинання на певних довжинах хвиль, таких як 2,37, 1,39, 1,24, 1,13, 0,95, 0,88 та 0,72 мкм. Вони разом з прозорою частиною спектра можуть створювати «вікна прозорості» з мінімальним поглинанням на довжинах хвиль 0,85, 1,3 та 1,55 мкм. Ширина цих вікон залежить від складу скла серцевини оптичного волокна [71, с. 274]. Щоб знизити концентрацію водяних пар до рівня, достатнього для роботи на довжинах хвиль  $0,8 \div 0,9$  мкм, необхідно знизити їхню концентрацію до  $10^{-7}$ . Оптимальна концентрація групи  $\text{OH}^-$  при  $\lambda=1,2 \div 1,6$  мкм не повинна перевищувати  $10^{-8}$ , а до недавнього часу ця проблема була дуже складною для вирішення [25, с. 33].

Однак, з'явилися нові типи оптичних волокон (крива 5 на рисунку 1.6), які дозволяють відкривати нові робочі діапазони на довжинах хвиль в діапазоні  $350 \div 1450$  нм [68, с. 465]. Порівняно з традиційними одномодовими волокнами, зменшення втрат в межах вікна прозорості цих волокон дозволяє створювати лінії передачі з більшою довжиною регенераційної ділянки і передавати дані на великі відстані з високою швидкістю (10 Гбіт/с), приблизно на двічі більшу відстань [80, с. 2411].

Волокнами та світловодами не досконалою технологією їх виготовлення можуть бути забруднені, що спричиняє збільшення втрат (крива 6 на рис. 1.6). Ці втрати можуть бути зумовлені різними факторами, такими як нерівність границі серцевина-оболонка, згладжування цієї границі через дифузію домішок, що вводяться для зміни показника заломлення, коливання розмірів поперечного перерізу вздовж світловоду, мікро- та макровигини при виготовленні кабелю та забруднення волокон під час їх витягування [12, с. 116].

Експериментальна крива 4 (рис. 1.6) має три локальні мінімуми — вікна прозорості на довжинах хвиль 0,85, 1,3 та 1,55 мкм [81, с. 299]. Для визначення втрат оптичної потужності в оптичному волокні, необхідно виміряти потужність (або рівень потужності) на виході волокна та потужність (або рівень потужності), яка подається у волокно для дослідження.

Щоб обчислити втрати оптичної потужності в оптичному волокні, потрібно знати рівень потужності на виході досліджуваного волокна та потужність, що передається через нього. В розсіяному середовищі спостерігаються такі феномени, як інтерференція, дифракція, дисперсія та поляризація [67, с. 191].

Інтерференція відбувається, коли когерентні хвилі, які мають однакову частоту та незалежний від часу зсув фаз, накладаються одна на одну [72, с. 43].

Дифракція відбувається, коли світлові промені відхиляються від прямої лінії, проходячи поблизу границі перешкоди [16, с. 96].

Дисперсія залежить від частоти хвилі та спричинює різний оптичний шлях для хвиль з різною частотою [53, с. 635].

Поляризація визначає характер розподілу векторів напруженості електричного та магнітного поля електромагнітної хвилі в площині, перпендикулярній до напрямку її розповсюдження [29, с. 70].

Неполяризоване світло є світлом, у якому напрямок вектора напруженості електричного поля змінюється випадковим чином, наприклад, природне сонячне світло [75, с. 526].

Лінійно поляризовані хвилі - це ті, у яких вектор напруженості електричного поля коливається в одній площині на всьому шляху їх розповсюдження.

## 1.2 Часовий розподіл

Мультиплексування - це технологія передачі даних, яка дозволяє передавати більше одного потоку даних через один канал.

Це дозволяє використовувати більш ефективно доступну пропускну здатність каналу зв'язку, коли його ємність перевищує потреби одного користувача, і дозволяє уникнути зайвих витрат на встановлення додаткових ліній передачі [6, с. 123].

### 1.3 Метод частотної мультиплексації (FDM)

При отриманні сигналу на приймальному боці, оптична несуча поступає на фотодетектор, який генерує електричний груповий потік [66, с. 2493].

Сигнал підсилюється широкосмуговим підсилювачем та потім проходить через вузькосмугові фільтри, центральні частоти яких відповідають піднесучим частотам [78, с. 676].

FDM вважається частотним поділом каналів, де мультиплексування відбувається за методом поділу по частоті.

В цьому випадку по одному кабелю може передаватися багато каналів, в яких сигнал є низькочастотним та модулює сигнал високоякісного генератора [20, с. 52].

Система FDM може передавати як аналогові, так і цифрові компоненти сигналу.

Цей метод використовується в кабельних системах багатоканального телебачення [60, с. 2259].

Приклад частотного ущільнення зображено на рисунку 1.5.

#### 1.3.1 Модове ущільнення

В деяких системах передачі даних, які використовують багатомодові оптичні волокна, використовується метод модового ущільнення (MDM - Mode Division Multiplexing).

Цей метод полягає в тому, що за допомогою геометричної оптики кут входу променя в плоскопаралельну пластину співпадає з кутом виходу (див. рисунок 1.6).

MDM застосовується для передачі кількох каналів даних через одне оптичне волокно, яке має багато мод [4, с. 43].

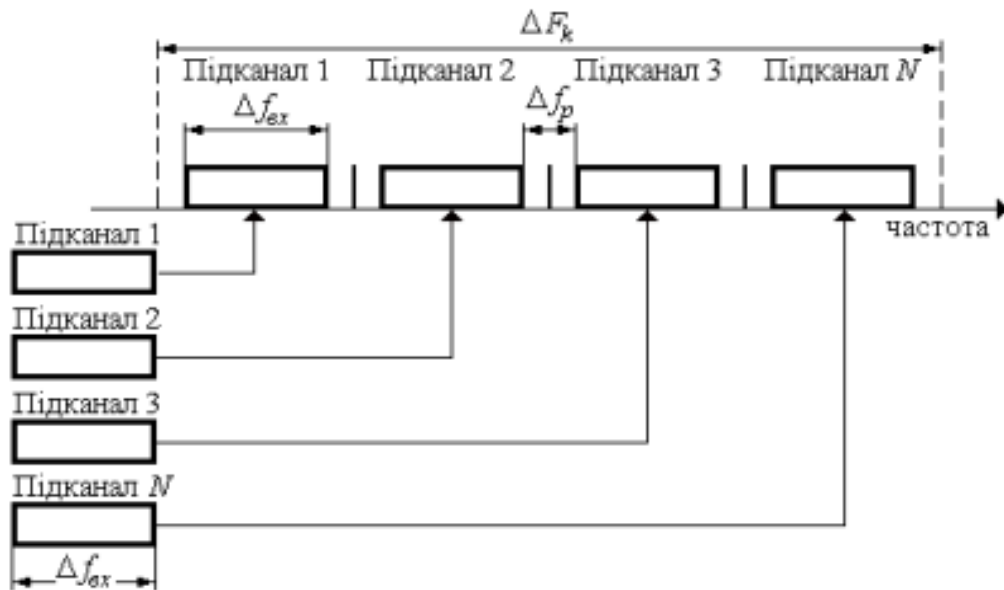


Рисунок 1.5 – Приклад частотного ущільнення

У системах передавання, що використовують багатомодове оптичне волокно, можна використовувати метод модового ущільнення (MDM - Mode Division Multiplexing).

Цей метод полягає в тому, що за допомогою кутових селекторів на вході та виході волокна передаються незалежні інформаційні потоки по каналах, які визначаються модами волокна [29, с. 72].

Проте, для успішного використання методу необхідно мати волокно без локальних неоднорідностей та вигинів, із запобіжними заходами на випадок переміщення та взаємоперетворень мод.

Цей метод може бути корисним для систем автоматики на невеликих відстанях передачі сигналів [36, с. 61].

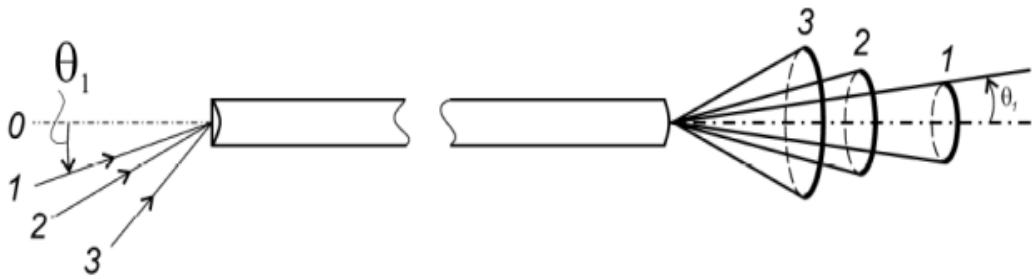


Рисунок 1.6 – Приклад модового (кутового) ущільнення.

### 1.3.2 Ущільнення за поляризацією

Поляризаційне ущільнення (PDM - Polarization Division Multiplexing) використовує оптичні несучі з лінійною поляризацією, які розташовані під різними кутами поляризації. Для мультиплексування використовуються спеціальні оптичні призми, наприклад, призми Рошона. Цей метод можна застосовувати з одномодовим волокном, але вимагає відсутності локальних неоднорідностей, вигинів та інших факторів, які можуть викликати локальну поляризаційну анізотропію і обмежують його ефективність [61, с. 834].

### 1.3.3 Розподіл бінарних потоків за часом

При застосуванні систем цифрової телефонії для передачі даних через мультиплексор, вже існують сформовані потоки двійкових даних, які представлені імпульсними сигналами [59, с. 7]. У такому випадку схема часового мультиплексування майже ідентична аналогічним схемам, які використовуються в комп'ютерних системах. Припустимо, що на входах мультиплексора є  $n$  послідовностей двійкових даних. Комутатор мультиплексора по черзі обирає будь-які послідовності бітів та формує з них загальну вихідну послідовність. Цей процес називається інтерлівінгом (interleaving) або чергуванням [75, с. 526].

Переставлення бітів, байтів, символів або блоків від кожного каналу послідовно комутуються до виходу мультиплексора через біт-інтерлівінг, байт-

інтерлівінг, символний інтерлівінг або блок-інтерлівінг [59, с. 9]. Схема мультиплексування чотирьох двійкових потоків даних використовує біт-інтерлівінг і показана на рис. 1.7. Цифри 1-4 відповідають номерам бітів, а індекси K1-K4 - номерам каналів.

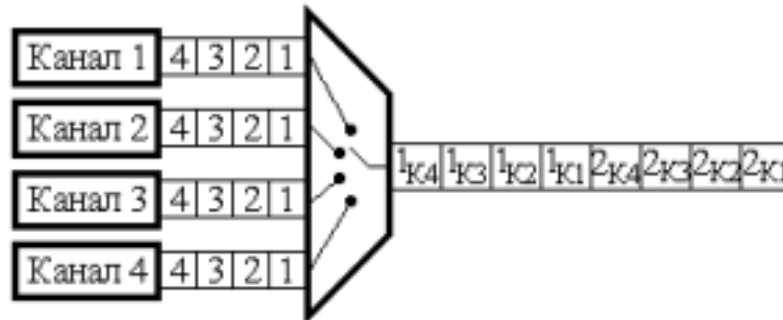


Рисунок 1.7 – Приклад розподілу бінарних потоків за часом

#### 1.4 Технологія WDM

Технологія Wavelength Division Multiplexing (WDM) - це спосіб передачі декількох незалежних каналів інформації оптичним волокном, використовуючи оптичні несучі з різними довжинами хвиль [41, с. 62]. Відмінністю WDM технології є те, що в одному волокні можна передавати багато оптично прозорих каналів з будь-яким форматом сигналу, зокрема синхронні, асинхронні і аналогові, без необхідності в єдиній структурі сигналів, як у системах із часовим ущільненням каналів передачі. WDM дає змогу значно підвищити пропускну здатність оптичного волокна, використовуючи всю оптичну смугу пропускання [57, с. 479].

Інформація в передачі по ВОСП передається за допомогою світлових хвиль, що розповсюджуються по оптичному волокну в діапазонах від 0,1 мкм до 1 мм, які називаються вікнами прозорості (рисунок 1.8). Ці вікна прозорості дозволяють ефективно передавати інформацію на великі відстані, забезпечуючи високу якість передачі [74, с. 556].

## 1.5 Аналіз волоконно-оптичних систем передач

Протягом 30-річного періоду від початку використання волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) в 70-х роках 20 ст. їх розвиток був визнаний успішним завдяки виробництву волоконних світловодів з низьким затуханням та надійних лазерів [58, с. 362]. За цей період, ВОСП зайняли провідну позицію у системах передачі інформації, що супроводжувалось постійним збільшенням сумарного трафіку передачі даних та зменшенням вартості одного біту інформації. Проте на сучасному етапі розвитку ВОСП акцент здійснюється на ефективності, і сучасні ВОСП виправдовують всі очікування.

### Переваги ВОСП:

- висока стійкість до електромагнітних перешкод з боку обладнання завдяки використанню діелектричного матеріалу;
- широка смуга пропускання завдяки високій частоті несучої хвилі, що дає можливість передачі великих обсягів інформації;
- менша вага та об'єм порівняно з мідними кабелями, що забезпечує більш ефективне використання простору;
- мале затухання світлового сигналу, що дозволяє підключати робочі ділянки на значні відстані;
- висока пожежостійкість, яка дозволяє використовувати ВОЛЗ на підприємствах підвищеної небезпеки;
- високий захист від захоплення конфіденційної інформації та несанкціонованого доступу завдяки відсутності випромінювання радіодіапазону та надчутливості ВОЛЗ до коливань;
- економічність, що дає можливість отримувати реальну економічну вигоду. Наприклад, використання ВОЛЗ дозволяє зекономити на підсилювачах, а також коштує в два рази дешевше за мідний кабель;
- довгий термін експлуатації, приблизно 25 років, який може бути збільшений завдяки модернізації та сучасним технологіям [21, с. 36].

Недоліки волоконно-оптичного зв'язку (ВОЛЗ) включають в себе високу ціну на інтерфейсне обладнання, яке необхідне для перетворення електричних сигналів в оптичні та навпаки, а також для розгортання мережі потрібні високоякісне комутаційне обладнання, розгалужувачі, атенюатори, з'єднувачі з низькими втратами та великим ресурсом на підключення-відключення [71, с. 275]. Крім того, монтаж, тестування та підтримка мережі також коштують чималих витрат. Оптоволокно потребує захисту, так як може пошкодитись через недостатню захищеність, що призводить до мікротріщин. Це вимагає чималої обробки, такої як покриття лаком, зміцнення металом або кевларом, що призводить до збільшення вартості. Незважаючи на ці недоліки, переваги ВОЛЗ зростають, і тому вона набирає все більшої популярності.

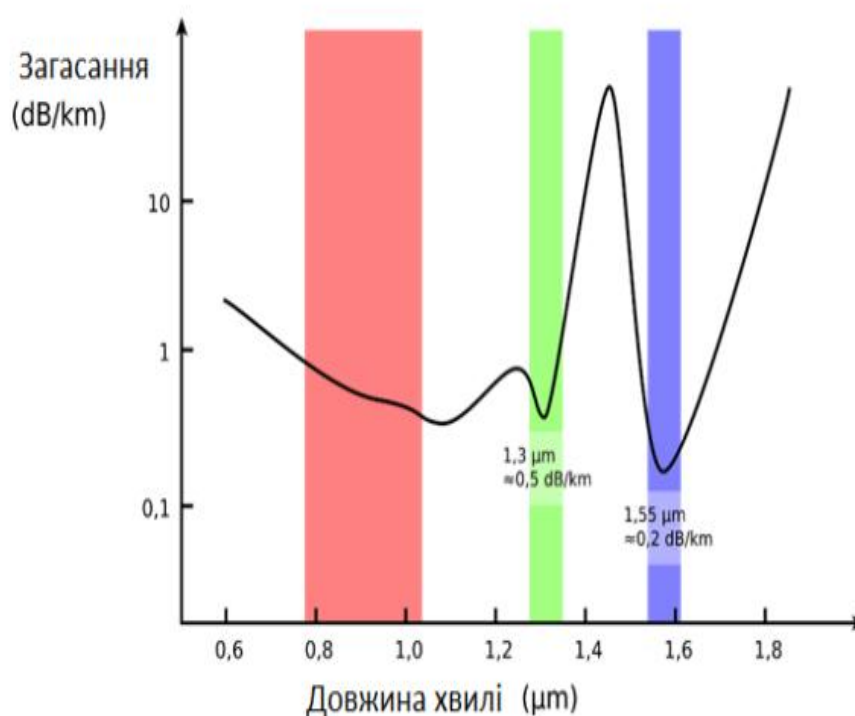


Рисунок 1.8 – Графік залежності загасання в кварцовому волокні від довжини хвилі випромінювання

Залежно від устаткування, що використовується для формування каналу, оптичні системи передачі інформації за волокном можуть бути поділені на:

- аналогові системи передачі з використанням волоконно-оптичного обладнання (АВОО), у яких каналоутворююче обладнання створюється на основі аналогових методів модуляції параметрів гармонійної несучої частоти (амплітудна, частотна, фазова модуляція та їх поєднання) або параметрів періодичної послідовності імпульсів (амплітудно-імпульсна, широтно-імпульсна, фазоімпульсна модуляція та їх поєднання);
- цифрові системи передачі за волокном (ЦСПВ), у яких каналоутворююче обладнання засноване на імпульсній кодовій модуляції, дельта-модуляції та їх різновидах. ЦСПВ є найбільш поширеними [10, с. 29].

### 1.6 Висновки до розділу

Передача світлового сигналу в оптоволоконних кабелях залежить від фізичних властивостей світла та середовища передачі, а також хімічного складу та механічних особливостей кабелю. Ефективність передачі залежить від довжини хвилі та кута подачі, які різняться для одномодових та багатомодових кабелів. Технології мультиплексування використовуються для збільшення пропускної здатності, проте їх ефективність може відрізнятись, а деякі з них потребують великої кількості складного обладнання. Металеві волокна є однією з альтернативних технологій передачі даних. Вони складаються з набору тонких металевих дротів, що розташовані в середині захисної оболонки. Металеві волокна мають високу стійкість до електромагнітних перешкод, що дозволяє їм працювати в умовах з високим електромагнітним шумом. Однак, вони мають більш високу дисперсію сигналу порівняно з оптичними волокнами і не забезпечують таку високу швидкість передачі даних. Крім того, металеві волокна можуть бути більш вразливі до пошкоджень та перебоїв у роботі, що може призвести до зниження якості передачі даних. Тому оптичні волокна залишаються більш популярним та ефективним варіантом для передачі великих обсягів даних на великі відстані.

## 2 ОСНОВНІ МЕТОДИ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ СИГНАЛІВ В ОПТИЧНИХ КАБЕЛЯХ

### 2.1 Технології передачі даних: Ethernet, ATM та SDH

Оптичне волокно, як середовище передачі інформації, є більш ефективним і здатним на більшу пропускну здатність, порівняно з мідним кабелем. Проте, воно також є значно дорожчим як у виробництві, так і в процесі монтажу, тому виникає потреба у системах та методах ущільнення сигналу [34, с. 94]. Один з таких методів - мультиплексування, яке забезпечує збільшення пропускну здатності одного фізичного каналу і надає можливість використовувати його більшої кількості користувачів. Мультиплексування дозволяє економити вартість і ресурси при використанні оптичного волокна, що стає все важливішим у зростаючих потребах у швидкісних мережах і високошвидкісному Інтернеті [78, с. 677].

Технологія SDH використовує принцип TDM (Time Division Multiplexing), що означає, що кожне вхідне повідомлення від окремих користувачів має свій визначений проміжок часу для передачі, і ці канали комутуються. Одним з найважливіших принципів є об'єднання вхідних сигналів у віртуальні контейнери і їх мультиплексування у синхронних транспортних модулях різних рівнів STM-1, STM-4, STM-16, STM-64, та STM-256, що відповідає вхідним сигналам з швидкістю 155,52 Мбіт/с, 622,08 Мбіт/с, 2488,32 Мбіт/с, 9953,28 Мбіт/с та 39813,12 Мбіт/с відповідно [37, с. 201].

Ethernet - це популярна технологія для передачі даних в локальних мережах. Вона є простою та доступною для використання на коротких та середніх відстанях до кількох сотень кілометрів [48, с. 31]. Інтеграція Ethernet з мережевими пристроями, такими як мультиплексори введення/виведення SDH та оптичні лінійні системи WDM, може забезпечити значні економічні вигоди. Сучасні оптичні інтерфейси Ethernet, які підтримують швидкості від 100 Мбіт/с до 10 Гбіт/с, широко використовуються на ринку обладнання. Для об'єднання

оптичних потоків Ethernet використовуються комбайнери, а найкращою технологією для передачі потоків Ethernet на швидкості 10 Гбіт/с є WDM. На ринку обладнання також широко використовуються різні інтерфейси Ethernet, такі як 1 Гбіт/с, і вони зазвичай використовують прийомопередавачі залежно від потреб даних на конкретній відстані передачі [62, с. 4632].

## 2.2 Технології передачі даних DWDM та CWDM

В світі технологія WDM використовується у двох основних типах систем: системи з щільним спектральним розділенням каналів DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) та системи з нещільним спектральним розділенням каналів CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) [14, с. 99]. В даний час, WDM системи використовуються як на великі відстані Long Haul для магістральних ВОЛЗ, так і в міських внутрішньо зонних Metro WDM системах [15, с. 38].

Для розділення каналів в сучасних DWDM системах використовують рознесення каналів 100 ГГц або приблизно 0,8 нм. У системах CWDM розділення каналів здійснюється на значно більшій частотній відстані 2500 ГГц або приблизно 20 нм [63, с. 324].

На рисунку 2.1 показано приклад спектра групового потоку для 4-канальної CWDM системи, а на рисунку 2.2 - для 32-канальної DWDM системи (на спектрах також зазначено спектр каналу OSC, що знаходиться окремо від основного групового потоку).

Додатково можна зазначити, що технології WDM є ключовими для забезпечення високошвидкісних оптичних мереж, зокрема, для передачі великого обсягу даних на великі відстані.

Ці технології дають можливість передавати більше інформації за допомогою одного волокна, що робить оптичні мережі ефективнішими та економічнішими у порівнянні з традиційними електронними мережами [30, с. 38].

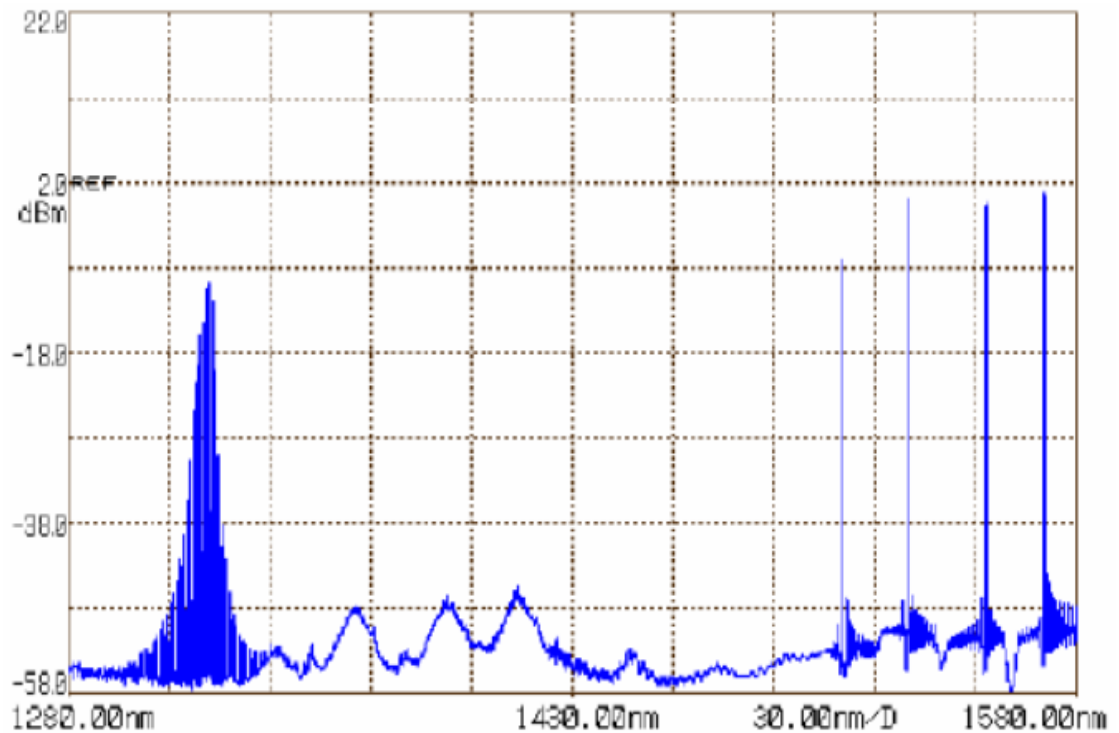


Рисунок 2.1 – Зразок спектра лінійного сигналу в системі CWDM

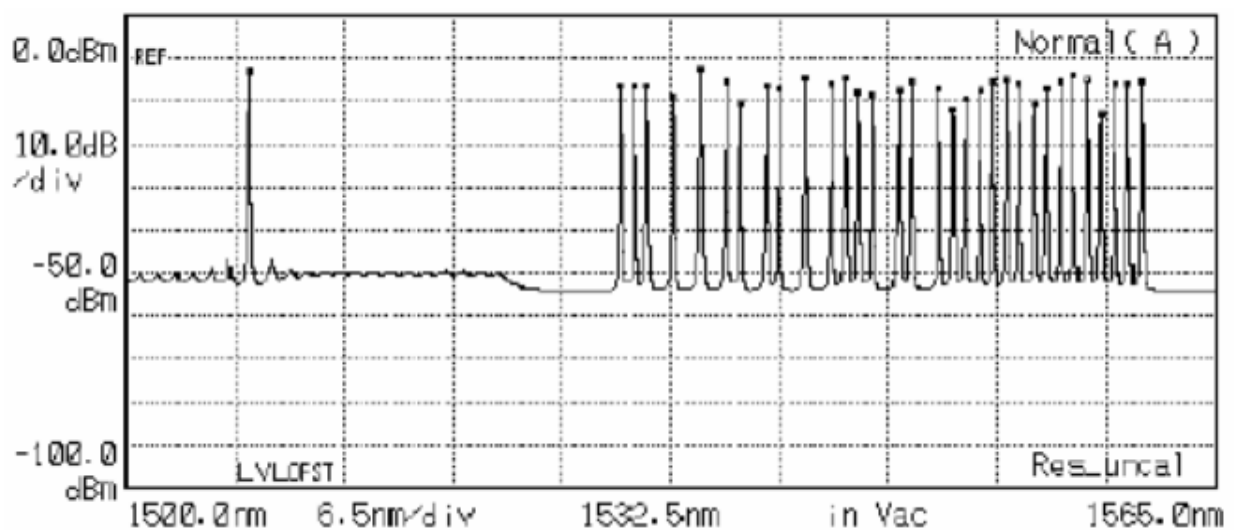


Рисунок 2.2 – Зразок спектра лінійного сигналу в системі DWDM

З використанням оптичних підсилювачів та мультиплексорів введення/виведення ОАДМ (Optical Add/Drop Multiplexer).

Які забезпечують маршрутизацію, з'являються повністю оптичні транспортні мережі (ОТМ) - OTN (Optical Transport Networking) [44, с. 137].

В системах WDM використовуються чітко визначені діапазони довжин хвиль оптичного випромінювання.

В таблиці 2.1 представлені номінальні центри довжин хвиль для CWDM систем.

Таблиця 2.1 – Номінальні центри довжин хвиль для CWDM

Номінальні центри довжин хвиль з рознесенням 20 нм для CWDM					
1271	1331	1391	1451	1511	1571
1291	1351	1411	1471	1531	1591
1311	1371	1431	1491	1551	1611

Формули для DWDM з різною величиною рознесення центральних довжин хвиль за частотою використовуються для визначення діапазонів оптичного випромінювання [64, с. 770].

DWDM технологію можна поділити на DWDM та HDWDM (High Dense Wavelength Division Multiplexing - надщільне спектральне мультиплексування) за частотним рознесенням каналів, як це показано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Частотне рознесення каналів для C та L діапазонів

Номінальні центральні частоти для рознесення каналів				Номінальні центральні довжини хвиль, нм
HDWDM			DWDM	
12.5 ГГц	25 ГГц	50 ГГц	100 ГГц	
C – діапазон				
193.2125	–	–	–	1551.62
193.2000	193.200	193.20	193.2	1551.72

Продовження таблиці 2.2 – Частотне рознесення каналів для С та L діапазонів

Номінальні центральні частоти для рознесення каналів				Номінальні центральні довжини хвиль, нм
HDWDM			DWDM	
12.5 ГГц	25 ГГц	50 ГГц	100 ГГц	
С – діапазон				
193.1750	193.175	–	–	1551.92
193.1625	–	–	–	1552.02
193.1500	193.150	193.15	–	1552.12
193.1375	–	–	–	1552.22
193.1250	193.125	–	–	1552.32
193.1125	–	–	–	1552.42
193.1000	193.100	193.10	193.1	1552.52
193.0875	–	–	–	1552.62
193.0750	193.075	–	–	1552.73
193.0625	–	–	–	1552.83
193.0500	193.050	193.05	–	1552.93
193.0375	–	–	–	1553.03
193.0250	193.025	–	–	1553.13
193.0125	–	–	–	1553.23
193.0000	193.000	193.00	193.0	1553.33
192.9875	–	–	–	1553.43
192.9750	192.975	–	–	1553.53

Кінець таблиці 2.2 – Частотне рознесення каналів для С та L діапазонів

Номінальні центральні частоти для рознесення каналів				Номінальні центральні довжини хвиль, нм
HDWDM			DWDM	
12.5 ГГц	25 ГГц	50 ГГц	100 ГГц	
L – діапазон				
184.7750	184.775	–	–	1622.47
184.7625	–	–	–	1622.58
184.7500	184.750	184.75	–	1622.69
184.7375	–	–	–	1622.80
184.7250	184.725	–	–	1622.91
184.7125	–	–	–	1623.02
184.7000	184.700	184.70	184.7	1623.13
184.6875	–	–	–	1623.24
184.6750	184.675	–	–	1623.35
184.6625	–	–	–	1623.46
184.6500	184.650	184.65	–	1623.57
184.6375	–	–	–	1623.68
184.6250	184.625	–	–	1623.79
184.6125	–	–	–	1623.90
184.6000	184.600	184.60	184.70	1624.01
184.5875	–	–	–	1624.12
184.5750	184.575	–	–	1624.23

Таблиця 2.3 містить інформацію про межі оптичних діапазонів для одномодового волокна, що використовується для роботи з технологією WDM [6, с. 125].

Таблиця 2.3 – Межі оптичних діапазонів

Смуга	Назва	Діапазон (нм)
O	Original	1260 ÷ 1360
E	Extended	1360 ÷ 1460
S	Shortwavelength	1460 ÷ 1530
C	Conventional	1530 ÷ 1565
L	Longwavelength	1565 ÷ 1625
U	Ultralongwavelength	1625 ÷ 1675

Рисунок 2.3 ілюструє спектральну залежність затухання оптичного сигналу в одномодовому волокні, відображену у вигляді графіка погонних втрат потужності.

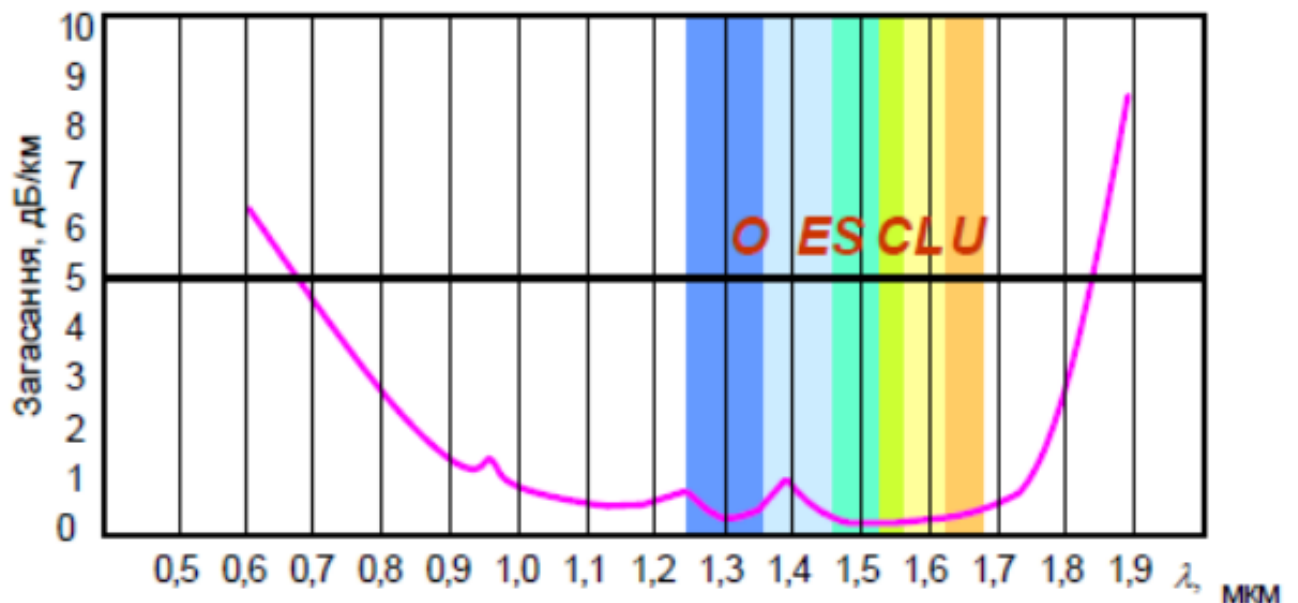


Рисунок 2.3 – Межі оптичних діапазонів.

Технологія CWDM має більш широке застосування на міських мережах, оскільки вона вимагає менших витрат на введення, завдяки тому, що не потребує застосування оптичних підсилювачів та має меншу ємність [30, с. 36].

Багато сучасних DWDM систем використовують C-діапазон, який забезпечує максимальне підсилення волоконних оптичних підсилювачів, легованих іонами ербію [31, с. 173]. В C-діпазоні можна передавати до 80 оптичних каналів. Однак, щоб уникнути втрат, що виникають через нелінійну взаємодію між каналами, а також дотриматись санітарних норм, необхідно обмежити сумарну потужність у оптичному волокні до 100 мВт (20 дБм). Це обмеження також визначає рівень потужності на кожному оптичному каналі, що складає 1 дБм для 80-канальних систем, 4 дБм для 40-канальних і 5 дБм для 32-канальних [4, с. 43]. Таким чином, для 32-канальних систем на кожній підсилювальній ділянці потрібен більший запас в 1 дБ порівняно з 40-канальними системами і в 4 дБ порівняно з 80-канальними, що збільшує довжину підсилювальної ділянки.

### 2.2.1 Порівняння WDM та TDM

Технологія SDH, яка ґрунтується на TDM і досягла швидкості передачі 10 Гбіт/с, зіткнулась з проблемами хроматичної та поляризаційної дисперсії моди, що починають суттєво впливати на якість передачі на швидкостях вищих за 10 Гбіт/с. Розширення пропускної здатності за допомогою TDM виявляється складним [13, с. 18].

У порівнянні з TDM, технологія WDM має менше обмежень та проблем. Замість збільшення швидкості передачі в оптичному каналі, як у TDM, у WDM системах збільшується кількість каналів, що передаються на різних довжинах хвиль [82, с. 814].

В системах WDM неважливим є формат даних, що передається у груповому сигналі [41, с. 63].

Сигнал в груповому потоці WDM не піддається пакуванню в контейнери, тому можна безпосередньо передавати різнорідний за форматом трафік (рис. 2.4.) [23, с. 46].

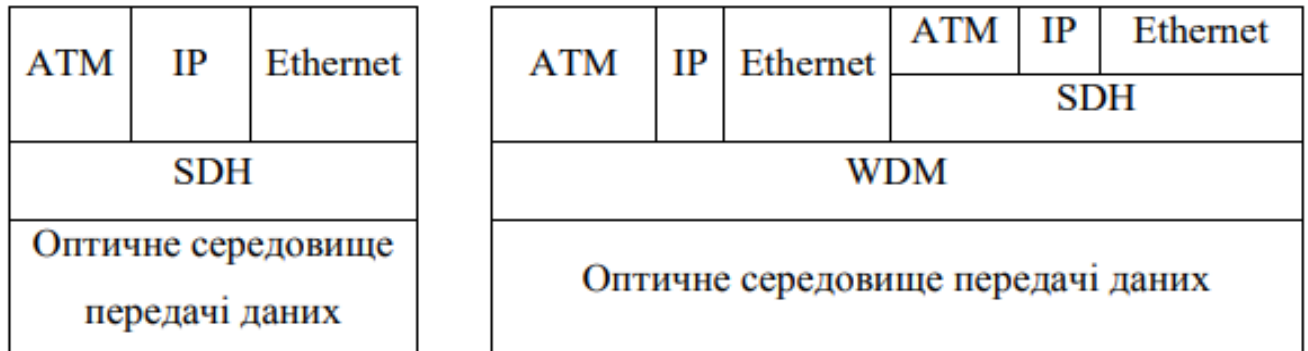


Рисунок 2.4 – Формат даних в SDH та WDM.

На відміну від TDM, де кожен канал має фіксований час для передачі даних, WDM дозволяє передавати дані одночасно на різних довжинах хвиль, що забезпечує більшу ефективність використання пропускну здатності оптичного каналу.

Крім того, WDM дозволяє передавати дані на великі відстані без необхідності в підсиленні сигналу, що дозволяє зменшити вартість мережі [34, с. 115].

Також слід зазначити, що DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) дозволяє передавати більшу кількість каналів на одній оптичній лінії з використанням вузькосмугових проміжків в спектрі світла. Це досягається за рахунок використання високоякісних оптичних компонентів, таких як високопродуктивні лазери, високоточні фільтри і детектори, що дозволяють забезпечити високу точність розділення каналів і мінімальні взаємовпливи між ними. Також слід зазначити, що DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) дозволяє передавати більшу кількість каналів на одній оптичній лінії з використанням вузькосмугових проміжків в спектрі світла. Це досягається за рахунок використання високоякісних оптичних компонентів.

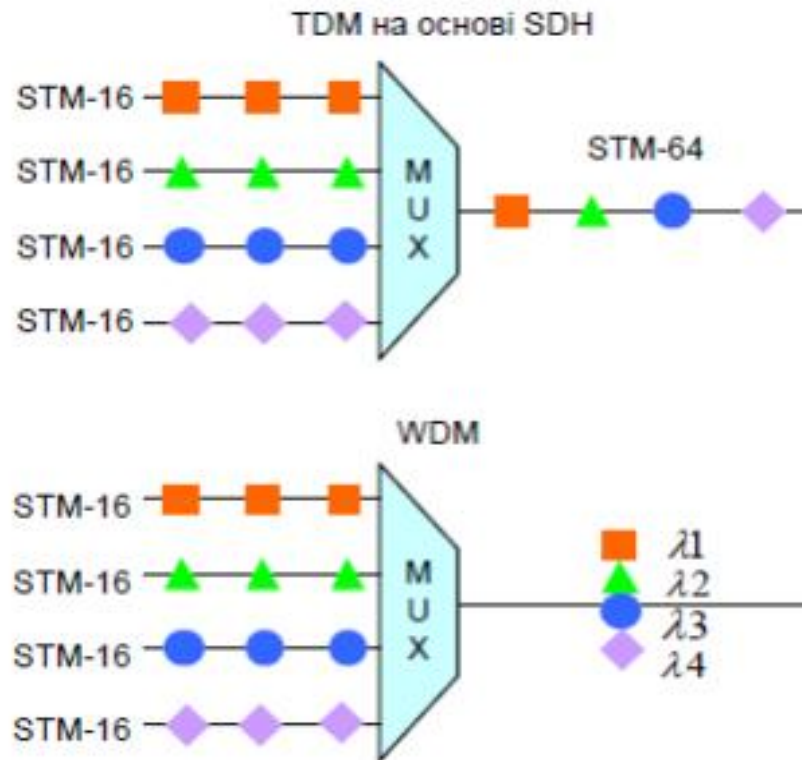


Рисунок 2.5 – Особливості передачі даних у мережах SDH та WDM.

Рисунок 2.5 демонструє різницю між WDM та TDM, що використовуються в сучасних системах SDH.

Тобто, технологія WDM доповнює TDM, дозволяючи значно збільшити пропускну здатність волоконно-оптичної лінії зв'язку та організувати двосторонню передачу даних по одному волокну, з нарощенням пропускну здатності на вже існуючому кабелі [12, с. 114]. У системі WDM різні сигнали з генерацією різних довжин хвиль, що поєднуються мультиплексором, утворюють багаточастотний груповий оптичний сигнал, що поширюється по одномодовому ОВ [56, с. 2]. Оптичні підсилювачі можуть бути встановлені на великих відстанях від початкової точки для підсилення сигналу. Демультиплексор виділяє початкові частотні канали з групового оптичного сигналу та направляє їх на відповідні фотоприймачі. У лінії або мережі зв'язку оптичні канали можуть бути додані або виділені за допомогою оптичних мультиплексорів введення/виведення (OADM).

### 2.3 PON (Passive Optical Network) – пасивна мережі доступу

PON (passive optical network) - це технологія передачі даних через оптичне волокно, яка дає користувачам доступ до широкосмугового мультисервісного доступу до мережі [16, с. 97]. Розподільна мережа доступу PON заснована на деревовидній волоконній кабельній архітектурі з пасивними оптичними розгалужувачами на вузлах. Ця технологія може бути використана для передачі різноманітних додатків і може бути найбільш економічною та ефективною забезпечуючи широкосмугову передачу даних. Архітектура PON може нарощувати як вузли мережі, так і пропускну здатність в залежності від потреб користувачів. Технологія PON використовує логічну топологію «точка-багатоточка» P2MP (point-to-multipoint), що покладена в основу технології PON. До одного порту центрального вузла можна підключати цілий волоконно-оптичний сегмент деревовидної архітектури, що охоплює десятки абонентів. Компактні, повністю пасивні оптичні розгалужувачі (сплітери), які не потребують живлення та обслуговування, встановлюються в проміжних вузлах дерева [26, с. 93].

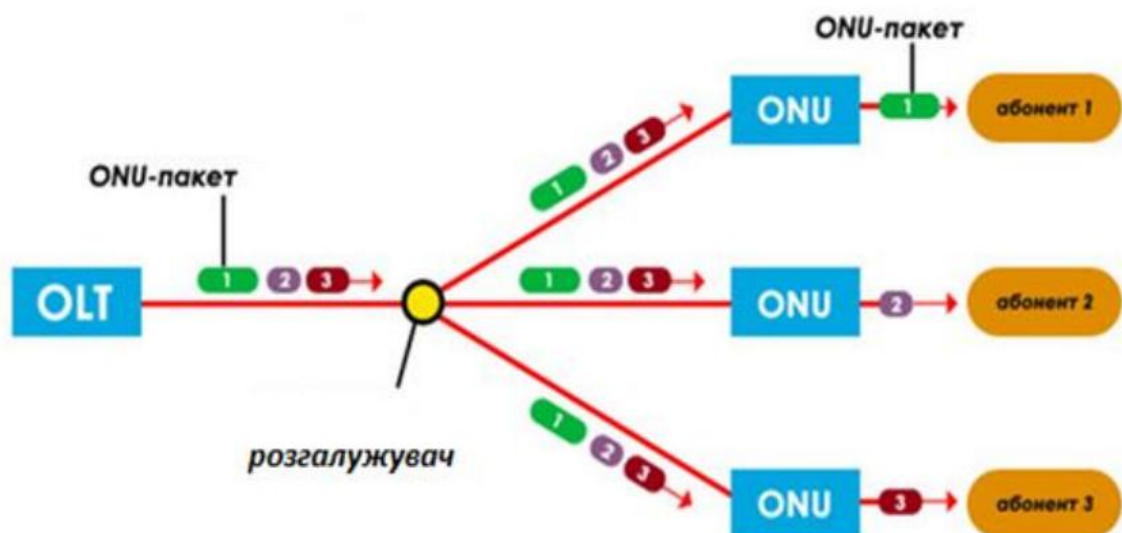


Рисунок 2.6 – Алгоритм роботи PON

У рисунку 2.6 наведено опис роботи PON (Passive Optical Network). Згідно з ним, мережа складається з трьох компонентів: OLT (Optical Line Terminal) - PON комутатора, розгалужувача (спліттера) та ONU - модема на стороні користувача. За допомогою одного OLT передається інформація до багатьох ONT (optical network terminal). Між ними розміщуються оптичні розгалужувачі, які не потребують живлення та обслуговування. Кількість підключених до одного комутатора ONT може бути дуже великою, залежно від потужності та максимальної швидкості прийому та передачі.

Загалом відомо, що використання PON може зменшити витрати на кабельну інфраструктуру шляхом зменшення загальної протяжності оптичного волокна. Це досягається за допомогою використання лише одного волокна від центрального вузла до спліттера [27, с. 51]. Звернення уваги на той факт, що існує інший спосіб економії - зменшення кількості оптичних передавачів та приймачів у центральному вузлі, що може бути більш економічним в деяких випадках. Наприклад, якщо розмістити конфігурацію PON з розгалужувачем в центральному офісі якомога ближче до центрального вузла, то це може бути вигідніше та краще, ніж топологія вигляду точка-точка. Ймовірно, що довжина оптичного волокна залишиться майже незмінною.

Оптична мережа доступу, заснована на пасивних оптичних компонентах, є економічно вигіднішою і дешевшою у впровадженні та експлуатації, порівняно з оптичною мережею, яка використовує активне обладнання. Тому при будівництві оптичних мереж доступу широко використовується технологія PON (Passive Optical Network) [24, с. 26]. Для побудови PON використовуються такі пасивні оптичні елементи, як одномодові оптичні волокна та кабелі, стрічки з оптичними волокнами та кабелі, оптичні розніми, пасивні розгалужувальні компоненти, пасивні оптичні атенюатори та зрощення.

Активні компоненти PON, такі як підсилювачі, передавачі, приймачі, медіаконвертори та інші, розташовуються лише в вузлі надання послуг зв'язку та абонентському вузлі [21, с. 35].

Ефективність PON базується на принципі розподілення потужності оптичного сигналу, котрий ділиться для надання послуг зв'язку багатьом користувачам.

Організація двостороннього зв'язку в PON мережах здійснюється двома способами: перший варіант використовує два оптичні волокна, одне для передачі сигналу від вузла мережі до користувача, а друге для передачі сигналу від користувача до вузла мережі, тоді як другий варіант використовує технологію WDM [11, с. 149].

Збільшення потужності вихідного оптичного сигналу може призвести до нелінійних явищ у волокні та погіршення роботи мережі, тому потрібно зменшувати втрати потужності в елементах PON та при з'єднанні з волокном. Одним зі способів використання технології WDM є створення низхідного потоку від вузла мережі до користувача, який формується за допомогою частотного (хвильового) об'єднання/розділення каналів (WDM), тоді як висхідний потік використовує технологію TDM [31, с. 172]. Рисунок 2.7 ілюструє таку організацію зв'язку.

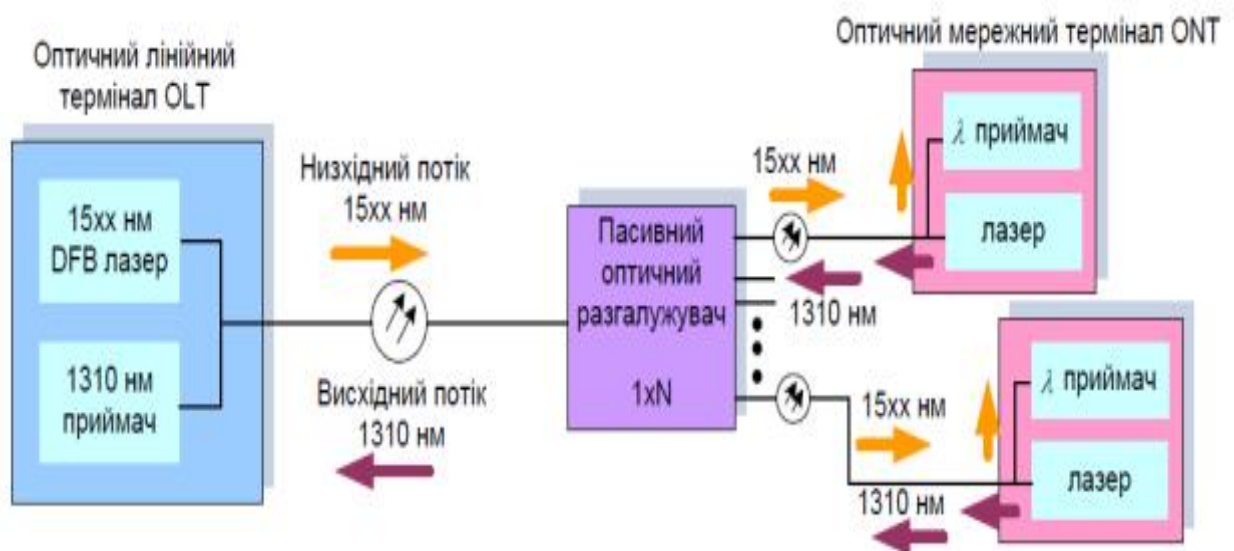


Рисунок 2.7 – Модель PON, яка використовує технології WDM та TDM.

Організація зв'язку, в якій обидва потоки (висхідний та низхідний) формуються за допомогою технології WDM, показана на рисунку 2.8 за допомогою розгалужувача-дуплексора.

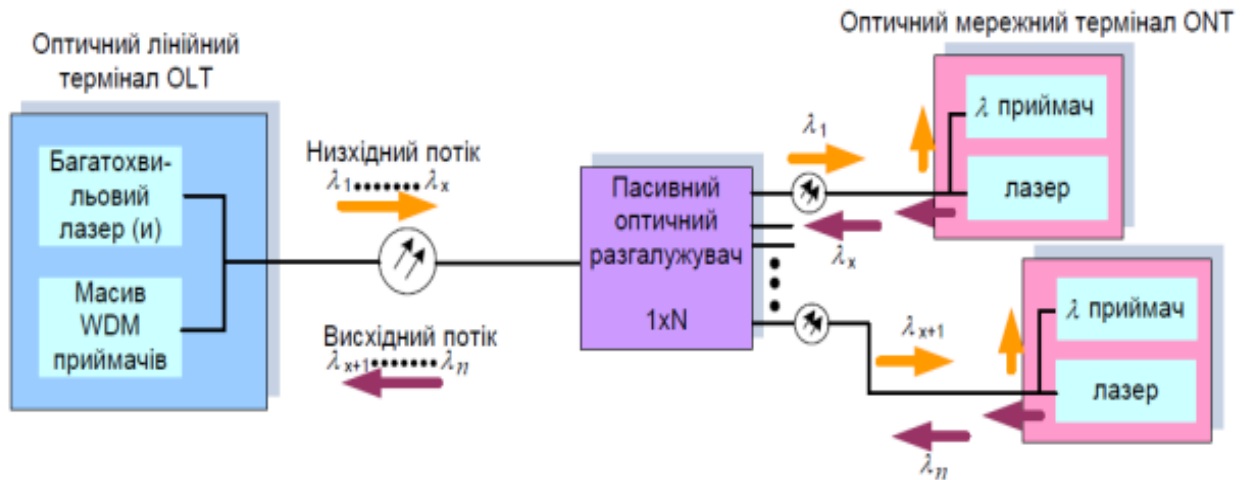


Рисунок 2.8 – Модель PON, яка використовує технологію WDM

Для створення мереж PON можна використовувати топології точка-точка, точка-мультиточка або кільцеву топологію [39, с. 94]. У разі точка-мультиточка можна розмістити пасивний розгалужувач у приміщенні оптичного лінійного терміналу, приміщенні користувача або на вулиці, забезпечуючи захист обладнання від зовнішніх впливів та кліматичних умов.

На сьогодні існують чотири регламентованих варіанти технології оптичних пасивних мереж PON:

- APON,
- BPON,
- EPON,
- GPON [50, с. 749].

### 2.3.1 APON

Стандарт APON (ATM PON) був першим в ряду стандартів PON і використовував технологію ATM як транспортний протокол. Висхідний потік, що

йшов від користувача до вузла мережі, передавався на довжині хвилі 1310 нм зі швидкістю передавання інформації 155 Мбіт/с. Низхідний потік, що йшов від вузла мережі до користувача, передавався на довжині хвилі 1550 нм зі швидкістю передавання 155 Мбіт/с [38, с. 105].

### 2.3.2 BPON

Технологія ATM використовується як транспортний протокол, що робить BPON наслідком розвитку APON. Швидкість передачі низхідного потоку / висхідного потоку може бути:

- 155,52 Мбіт/с / 155,52 Мбіт/с;
- 622,08 Мбіт/с / 155,52 Мбіт/с;
- 622,08 Мбіт/с / 622,08 Мбіт/с;
- 1244,16 Мбіт/с / 155,52 Мбіт/с;
- 1244,16 Мбіт/с / 622,08 Мбіт/с [1, с. 132].

Передача потоків здійснюється за допомогою WDM на довжинах хвиль 1550 нм (1490 нм) для передачі низхідного потоку та 1310 нм для передачі висхідного потоку. Або можна використовувати два оптичні волокна, одне з яких передає низхідний, а інше - висхідний потоки [24, с. 25].

### 2.3.3 GPON

У технології GPON використовується транспортний протокол SDH з протоколом формування пакетів GFP [58, с. 363]. Головні завдання розробки GPON полягали в забезпеченні роботи PON на гігабітних швидкостях передавання, визначенні специфікацій фізичного рівня для більш високої пропускної спроможності PON та розробці ефективного спектрального протоколу [19, с. 83]. GPON має маштабовану структуру кадрів зі швидкостями передавання від 622 Мбіт/с до 2,5 Гбіт/с. У мережах GPON для передавання даних потрібно два рівня формування пакетів, а саме: інформаційні потоки TDM та кадри Ethernet упаковуються в пакети GEM зі змінною довжиною, а комірки ATM та пакети

GEM формують пакети GTC, котрі передаються в мережі GPON. Контроль та керування в системі GTC складається з трьох частин OAM, PLOAM та OMCI. Швидкість передавання низхідного потоку / висхідного потоку може становити: 1244,16 Мбіт/с / 155,52 Мбіт/с, 1244,16 Мбіт/с / 622,08 Мбіт/с, 1244,16 Мбіт/с / 1244,16 Мбіт/с, 2488,32 Мбіт/с / 155,52 Мбіт/с, 2488,32 Мбіт/с / 622,08 Мбіт/с, 2488,32 Мбіт/с / 1244,16 Мбіт/с або 2488,32 Мбіт/с / 2488,32 Мбіт/с, залежно від умов використання концепцій FTTH або FTTC, а також технології ADSL [63, с. 326].

### 2.3.4 EPON

EPON (Ethernet PON) - це стандарт, визначений IEEE 802.3ah для систем зі швидкістю передачі інформації до 1 Гбіт/с, а також для систем зі швидкістю передачі інформації 100 Мбіт/с, організованих у точка-точка [18, с. 35]. В якості транспортного протоколу використовується технологія Ethernet. Для передачі даних вниз використовується швидкість 1 Гбіт/с на довжинах хвиль 1550 або 1490 нм, а для передачі даних вгору - швидкість 1 Гбіт/с на довжині хвилі 1310 нм (для передачі даних вниз і вгору також може використовуватися довжина хвилі 1310 нм). Технологія EPON також відома як GEPON, оскільки швидкість передачі даних становить 1 Гбіт/с [35, с. 57].

Для уникнення колізій, IEEE 802.3ah використовує багатоточковий протокол керування (MPCP) для контролю доступу, який використовує два типи команд: GATE та REPORT. Цей протокол забезпечує, що OLT та всі ONT мають однаковий час (відправляють часові мітки в GATE командах, які визначають час початку передачі даних для даного ONT та тривалість передачі інформації). GATE команди відправляються вниз до всіх ONT (які визначають час початку та тривалість передачі), а користувачі відповідають звітними повідомленнями REPORT [45, с. 22].

Часові мітки в GATE командах дозволяють ONT синхронізувати свої годинники з часовою міткою в команді, що дозволяє перевірити синхронізацію

між ONT та OLT. Якщо відхилення перевищує встановлене порігове значення, ONT переходить у режим ініціалізації [53, с. 638]. Оскільки технологія EPON не має можливості фрагментувати кадри, на відміну від технологій APON, BPON і GPON, якщо наступний кадр у буфері не вміщується в виділений інтервал часу для передачі, то кадр буде чекати на наступний інтервал часу для передачі [79, с. 215].

Для виявлення та виправлення помилок використовується сервісне повідомлення Operation, Administration & Maintenance (OAM). Усі ці команди передаються в загальному потоці інформації разом з повідомленнями інформації [28, с. 88]. Тривалість передачі кадру GATE (з підготовчим сигналом) довжиною 72 байти становить 6 мікросекунд. Максимальна тривалість передачі кадру Ethernet (з підготовчим сигналом) довжиною 1526 байтів є залежною від швидкості передачі даних в мережі і може становити до 12 мікросекунд [40, с. 126].

У цілому, технологія EPON є ефективним рішенням для передачі даних на відстані до 20 км із швидкістю до 1 Гбіт/с. Вона є менш коштовною і більш простою у встановленні та обслуговуванні, порівняно з іншими PON технологіями. Проте, при великому обсязі трафіку і багатьох користувачах одночасно, може виникнути проблема з недостатньою пропускну здатністю мережі [68, с. 467].

### 2.3.5 Приклад організації передачі даних у пасивних оптичних мережах з використанням технології GEPON

На прикладі GEPON показано, як передаються дані в пасивних оптичних мережах. На стороні провайдера встановлюється Оптичний Лінійний Термінал (OLT), що має порти для з'єднання з L3 роутером та клієнтськими портами. У свою чергу, клієнт встановлює Оптичну Мережеву Одиницю (ONU), що має оптичний та мідний порти. Між провайдером та клієнтом знаходиться пасивна оптична мережа з оптичним волокном та роздільниками, що працюють у режимі

«розгалужувача» та «змішувача» [51, с. 240]. Модель GPON зображена на рисунку 2.9.

В оптичній мережі PON використовуються різні методи доступу до мережі з боку OLT та ONU. Наприклад, з боку OLT використовується метод TDM, а з боку ONU - TDMA, що дозволяє різним абонентам отримувати доступ до мережі в різний час. При цьому, для забезпечення максимальної продуктивності мережі та забезпечення якісного передачі інформації, використовуються різні довжини хвиль передачі сигналів в залежності від напрямку передачі [52, с. 183].

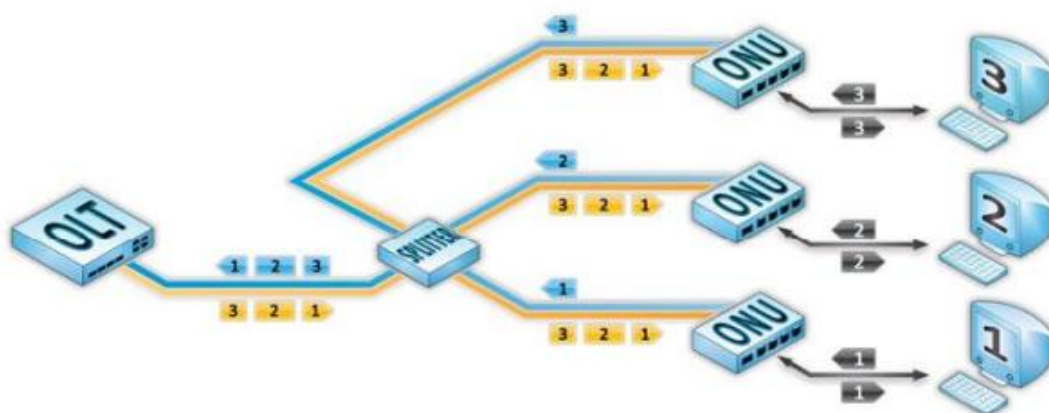


Рисунок 2.9 – Модель GPON

Налаштування параметрів передачі даних у мережі PON виконуються з метою оптимізації швидкості і якості передачі.

Вхідні та вихідні потоки даних в PON обмежені різними довжинами хвиль, що є причиною використання TDM і TDMA технологій [43, с. 168].

Протокол MPCP забезпечує координацію між OLT та ONU, що дозволяє здійснювати керування мережею та оптимізувати процес передачі даних.

Вихідний сигнал від OLT передається на довжині хвилі 1490 нм, а сигнал від ONU до OLT передається на довжині хвилі 1310 нм, що й наведено на рисунку 2.10 [54, с. 671].

Це забезпечує розділення каналів, що дає змогу передавати дані в двох напрямках по тому ж самому оптичному волокну без конфлікту між вихідним та вхідним сигналом.

Також вказано, що передавачі CATV також можуть передавати дані по дереву PON до абонента, використовуючи довжину хвилі 1550 нм або 1310 нм.

Це означає, що одна оптична мережа може передавати як дані Інтернету, так і аналогове телебачення, що є великим перевагою цієї технології.

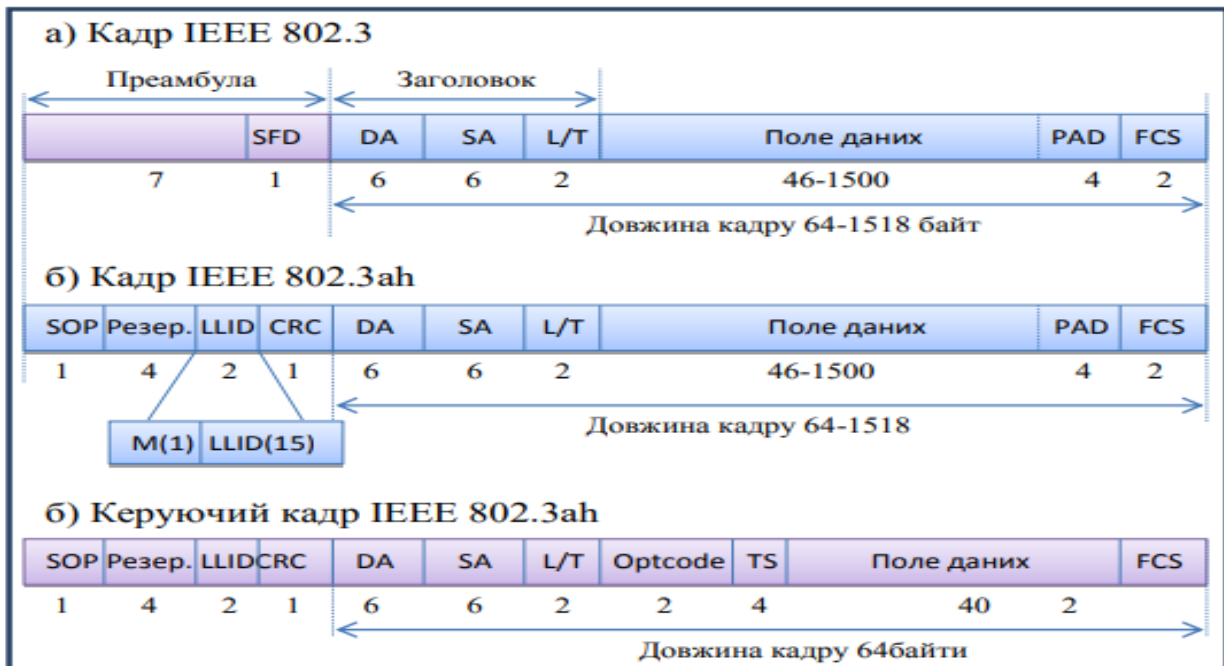


Рисунок 2.10 – Кадри Ethernet та PON

Додання декількох службових полів до преамбули стандартного кадру Ethernet (Кадр IEEE 802.3).

Зокрема, додається поле SOP (Start Of Packet), яке вказує на початок кадру, резервне поле, LLID (Logical Link Identifier), що вказує індивідуальний ідентифікатор вузла EPON, та CRC (Circle Redundancy Check) – контрольна сума по преамбулі (стандарт P802.3ah).

Ці зміни не порушують сенсу преамбули кадру Ethernet і допомагають емулювати з'єднання в мережі EPON [60, с. 2258].

При виході кадру з мережі GEPON преамбула кадру перетворюється до стандартного вигляду – тег ліквідується, і поля кадру EPON збігаються з полями стандартного кадру Ethernet, зокрема, DA (Destination Address), яке вказує Mac-Адреса станції призначення, SA (Source Address), яке вказує Mac-Адреса станції

відправника, L/T (Length/Type), яке містить інформацію про довжину або тип кадру, поле даних змінної довжини, PAD (наповнювач), яке використовується для доповнення кадру до мінімального розміру, Opcode (Optional Code), яке уточнює тип керуючого кадру, і TS (Time Stamp), яке містить часову мітку відправника [31, с. 174].

Оскільки LLID виділяється відповідним підрівнем на ONU, вузол ONU у нормальному режимі роботи обробляє тільки ті кадри, у преамбулі яких ідентифікатор LLID збігається із власним LLID.

Цей підхід дозволяє забезпечити правильну інкапсуляцію кадрів Ethernet в мережі EPON.



Рисунок 2.11– Перетворення пакетів в PON

На рисунку 2.11 зображено процес перетворення пакетів з одного стандарту на інший, який здійснюється мережею PON за допомогою відповідного алгоритму роботи.

#### 2.4 Основні методи цифрового кодування

Метод передачі даних NRZ - це безповоротне кодування (Non Return to Zero), при якому біти «0» передаються за допомогою сигналу з нульовою напругою (0 В), а біти «1» передаються сигналом з напругою +V [47, с. 165]. Хоча цей метод є базовим для більш складних алгоритмів кодування, йому притаманний ряд недоліків (високий рівень постійної напруги, широкий спектр сигналу та інші.) Загальний вигляд двійкового ряду в коді NRZ можна побачити на рисунку 2.12.

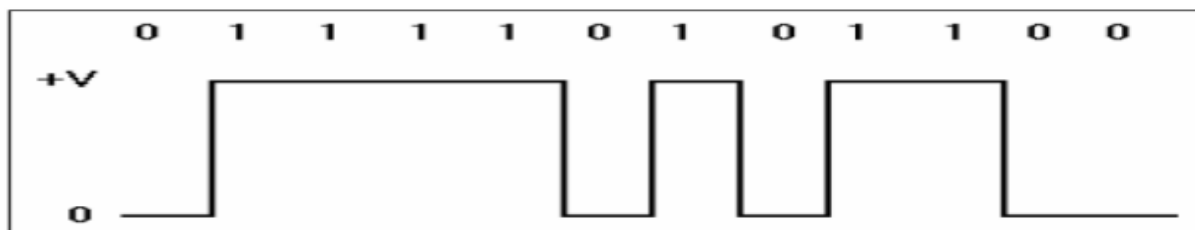


Рисунок 2.12 – Цифрове кодування методом NRZ

Метод кодування RZ, що означає «повернення до нуля», полягає в тому, що біти «0» передаються нульовою напругою (0 В), а біти «1» - напругою +V в першій частині інтервалу і нульовою напругою в другій частині. Порівняно з методом NRZ, цей метод має переваги, такі як менша середня напруга в лінії та можливість передачі послідовності «1» без постійного сигналу в лінії [32, с. 48]. Однак, ширина спектра сигналу у RZ є більшою, ніж у NRZ. На рисунку 2.13 показано загальний вид двійкового ряду, що представлений за методом RZ.

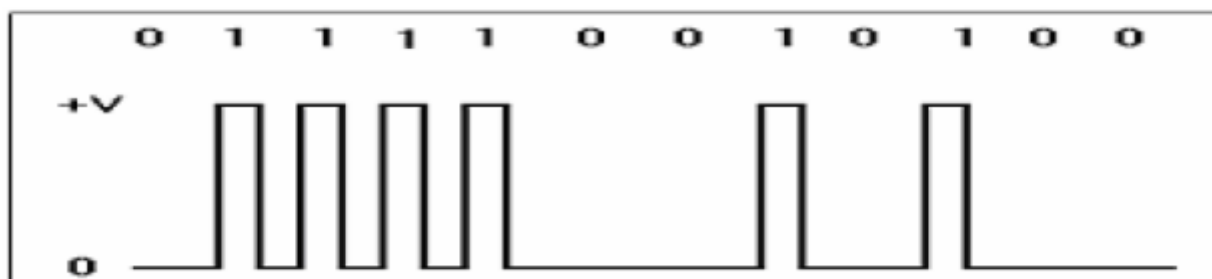


Рисунок 2.13 – Цифрове кодування методом RZ

NRZ I - це метод кодування без повернення до нуля з інверсією [40, с. 126]. Біти «0» передаються нульовою напругою (0 В), а біти «1» передаються нульовою напругою (0 В) або напругою +V в залежності від того, яка напруга була в попередньому біті. Якщо напруга попереднього біта була (0 В), то одиниця буде представлена напругою +V, а якщо напруга попереднього біта була +V, то одиниця буде представлена напругою (0 В). Цей метод має перевагу в тому, що ширина спектру сигналу буде така сама, як у NRZ, і за умови передачі безперервної послідовності «1» сигнал в лінії не залишається постійним

[46, с. 219]. Загальний вигляд двійкового ряду, що представлений у коді NRZ I, показано на рисунку 2.14.

Крім методів кодування, які були описані вище, існують ще й інші методи, такі як Manchester, Differential Manchester, AMI (Alternate Mark Inversion), Biphas-Mark (и деякі інші), які також використовуються для цифрового кодування [48, с. 34]. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, та в залежності від потреб конкретної задачі, може використовуватися той чи інший метод.

Також варто зазначити, що зростання швидкості передачі даних та зменшення розміру пристроїв, що їх використовують, вимагають постійного розвитку технологій кодування та розробки нових методів, що дозволяють забезпечувати якісну та надійну передачу даних. При цифровому кодуванні застосовують або потенційні, або імпульсні коди. При потенційному кодуванні інформативним є рівень сигналу.

Крім того, з розвитком бездротових технологій передачі даних, таких як Wi-Fi, Bluetooth, NFC та ін., методи цифрового кодування також застосовуються для передачі даних в бездротових мережах. Наприклад, для передачі даних по Wi-Fi використовується метод 802.11, який базується на методі кодування Biphas-Mark [7, с. 21].

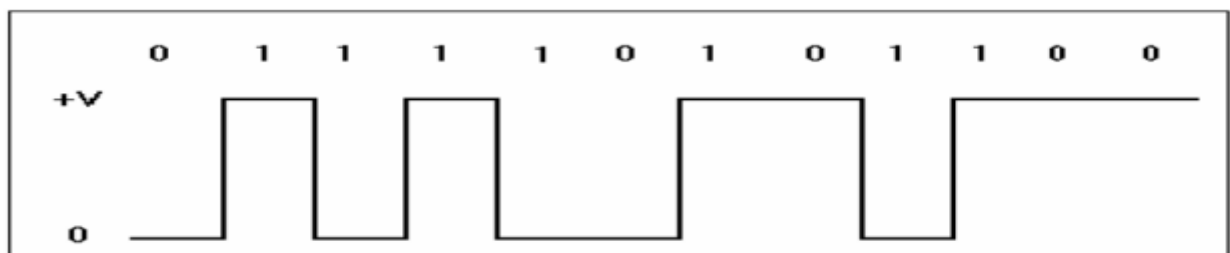


Рисунок 2.14 – Цифрове кодування методом NRZI

## 2.5 Висновки до розділу

Основні системи мультиплексування сигналу в оптоволоконному кабелі включають WDM та PON.

WDM системи застосовують метод розділення сигналу за довжиною хвилі, щоб збільшити пропускну здатність каналу.

Для досягнення цього використовують передавачі, які надсилають світлові сигнали різної довжини хвилі, і залежно від кількості каналів застосовуються CWDM або DWDM системи.

Проте, обмеження загальної потужності сигналу в оптоволоконному кабелі створює певні обмеження, і чим більше каналів передачі інформації, тим менша максимальна відстань передачі сигналу.

Це вимагає використання оптичних підсилювачів сигналу. В пасивних оптичних мережах використовують пасивні оптичні компоненти, що спрощує їх встановлення та знижує вартість.

Мультиплексування сигналу може бути реалізоване за допомогою технологій WDM, TDM та переформатування кадрів.

Низхідний та висхідний потік передається одночасно на різних частотах, а при передачі інформації від ONU до OLT використовується технологія ATDM, коли кожна станція передає інформацію в свій період часу.

При отриманні інформації, OLT передає пакети одночасно всім ONU, але приймають їх лише ті, котрим вони належать.

### 3 РОЗРОБКА АЛЬТЕРНАТИВНОГО МЕТОДУ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ

#### 3.1 Порівняння сучасних методів мультиплексування

На основі розглянутої інформації, можна провести порівняння технологій мультиплексування за допомогою таблиці 3.1.

В ній наведені різноманітні види стандартів PON та їхні основні характеристики, такі як швидкість передачі інформації по висхідному та низхідному потоках, базовий протокол, вид лінійного коду, максимальний радіус мережі, максимальна кількість абонентських вузлів на волокно, корекція помилок, довжини хвиль висхідного та низхідного потоків, можливість динамічного розподілу смуги, наявність IP-фрагментації, спосіб захисту даних, наявність резервування, оцінка підтримки мовних застосувань та QoS.

Ця таблиця дає можливість зробити комплексне порівняння різних стандартів PON, і відштовхуючись від результатів аналізу ми будемо мати вхідні дані, що допоможуть вибрати найкращий варіант для конкретної ситуації.

Таблиця 3.1 – Різниця у характеристиках пасивних оптичних мереж

Характеристики	APON (BPON)	EPON (GEPON)/ 10G EPON	GPON
Стандарт	ITU-T G.983.x	IEEE 802.3ah ITU G.985/ IEEE 802.3av	ITU-T G.984.x
Швидкість передавання, прямий/зворотній потік, Мбіт/с	155/155; 622/155; 622/622; для BPON також: (1244/155; 1244/622)	1000/1000 (G)/ 10Gbit/10Gbit; 10Gbit/1Gbit (10G)	1244/155, 622, 1244; 2488/622, 1244, 2488
Базовий протокол	ATM	Ethernet	SDH
Лінійний код	NRZ	8B/10B	NRZ

Кінець таблиці 3.1 – Різниці у характеристиках пасивних оптичних мереж

Характеристики	APON (BPON)	EPON (GEPON)/ 10G EPON	GPON
Максимальний радіус мережі, км	20	20	20
Максимальна кількість абонентських вузлів на волокно	уц	32 (G)/ 64 (10G)	до 128
Корекція помилок FEC	передбачена	немає	необхідна
Довжина хвилі низхідного/висхідного потоків, нм	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1480/1310)
Динамічний розподіл смуги	є	можливий	є
IP-фрагментація	є	немає	є
Захист даних	шифрування відкритими ключами	немає	шифрування відкритими ключами
Резервування	є	немає	є
Оцінка підтримки мовних застосувань та QoS	висока	низька	висока

Отже, можна зробити висновок, що серед пасивних оптичних мереж для сучасних потреб найбільш підходять GPON та EPON (10G EPON). Отже, GPON має кілька переваг порівняно з EPON, таких як вища швидкість передачі даних і можливість передавати сигнал аналогового телебачення, 10G EPON також має свої переваги, зокрема, найвищу швидкість передачі серед пасивних оптичних

мереж.

Загалом, пасивні оптичні мережі мають декілька переваг, таких як:

- низька вартість обладнання,
- простий процес встановлення,
- підключення нових абонентів,
- мала кількість компонентів у мережі.

Однак основним недоліком даної системи є те, що абонентський вузол може отримувати також дані інших вузлів, підключених до того ж спліттера, що і він.

Також у таблиці 3.2 представлений список сучасних систем спектрального ущільнення та їх характеристики, такі як кількість каналів, діапазон довжин хвиль на яких відбувається передача, відстань між сусідніми каналами та лінійна швидкість передачі.

Залежно від конкретних потреб та умов використання, можна обрати оптимальну технологію та архітектуру для пасивної оптичної мережі, якщо важливо мати високу швидкість передачі даних та можливість передавати сигнал аналогового телебачення, GPON може бути кращим вибором.

Також варто враховувати, що пасивні оптичні мережі мають загальні переваги, такі як низька вартість обладнання, простий процес встановлення та налаштування мережі, можливість одночасної передачі висхідного та низхідного потоків по одному волокні та складання мережі з малої кількості компонентів.

Одним з недоліків PON мереж є те, що абонентський вузол (ONU/ONT) при отриманні даних отримує також дані інших вузлів, що підключені до того ж спліттера, що і він.

Також, чим далі сигнал проходить по оптичному волокні, тим більше може бути його втрат.

Це може створювати проблеми з приватністю та безпекою даних. Але, проаналізувавши наукові джерела в мережі Інтернет, з'ясувалось що є доволі багато способів, щоб вирішити цю проблему. Тому що на сьогоднішній день питання щодо приватності та безпеки даних є дуже важливим, та над цим працюють одні з найкращих вчених світу.

Таблиця 3.2 – Основні характеристики сучасних WDM систем

Найменування та тип системи (DWDM або CWDM)	Компанія виробник	Число каналів	Діапазон довжин хвиль	Відстань між сусідніми каналами	Лінійна швидкість передачі
1626 LightManager	Alcatel	96 (192)	1530 ÷ 1570 нм	0,4 нм	100 Мбіт/с – 2,5 Гбіт/с, 10 Гбіт/с
1696 MetroSpan	Alcatel	32	1530 ÷ 1560 нм	0,8 нм	100 Мбіт/с – 2,5 Гбіт/с, 10 Гбіт/с
1696 MetroSpanCompact	Alcatel	8	1530 ÷ 1560 нм	0,8 нм	100 Мбіт/с – 2,5 Гбіт/с, 10 Гбіт/с
1692 MetroSpanEdge	Alcatel	8	1470 ÷ 1610 нм	20 нм	100 Мбіт/с – 2,5 Гбіт/с, 10 Гбіт/с
XDM (DWDM)	ECI	80	1529 ÷ 1561 нм 1570 ÷ 1603 нм	100 ГГц (0,8 нм)	2,5 Гбіт/с 10 Гбіт/с
XDM (CWDM)	ECI	16	1291 ÷ 1611 нм	2500 ГГц (20 нм)	2,5 Гбіт/с

Кінець таблиці 3.2 – Основні характеристики сучасних WDM систем

Найменування та тип системи (DWDM або CWDM)	Компанія виробник	Число каналів	Діапазон довжин хвиль	Відстань між сусідніми каналами	Лінійна швидкість передачі
SURPASS 7500	Siemens	До 160	1520 ÷ 1610 нм	100 ГГц і 50 ГГц	160 x 10 Гбіт/с
SURPASS 7540	Siemens	До 160	1528,77 ÷ 1607,47 нм	50 ГГц	12,5Гбіт/с
SURPASS 7540C	Siemens	До 800	1537,39 ÷ 1563.86 нм	50 ГГц	2,5Гбіт/с
FSP 3000 Metro DWDM	Siemens	64 / 32	1530,33 ÷ 1602,31 нм	200 ГГц	10 Гбіт/с

Рисунок 3.1 містить схему мультиплексування сигналу, де за допомогою розділення за довжиною хвилі, кожен вхідний сигнал з мультиплексора розбивається на окремі канали, що відповідають різним довжинам хвиль.

Застосування розділення за довжиною хвилі дозволяє передавати декілька сигналів одночасно через один оптоволоконний кабель, збільшуючи тим самим його пропускну здатність і зменшуючи загальну вартість передачі даних.

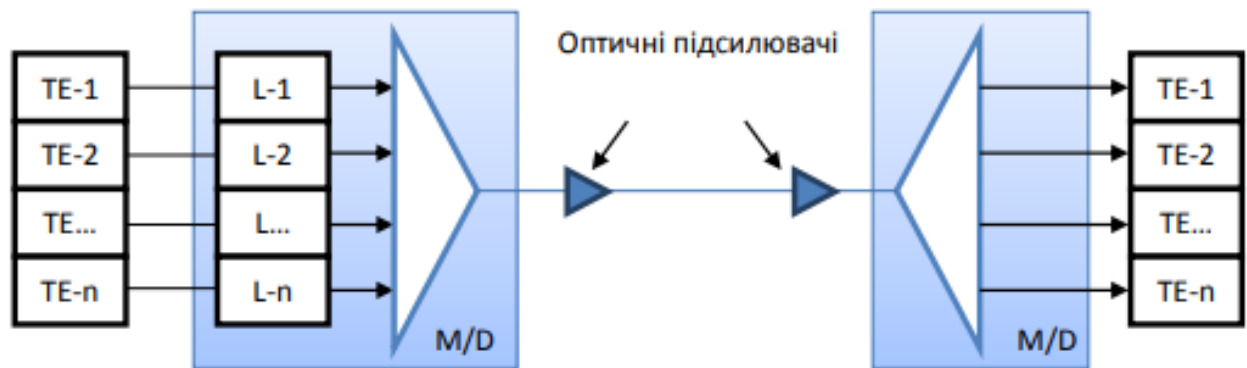


Рисунок 3.1 – Схема WDM

В даній схемі, на рисунку 3.1 термінальне обладнання з'єднується з лазером мультиплексора для передачі даних на своїй довжині хвилі у оптоволокну. Однак, у нашому випадку схема буде трохи відрізнятися, тому що введено додатковий елемент - контрольний модуль (СМ), що зображено на рисунку 3.2. Цей модуль відповідає за такі функції, як реєстрацію з'єднань з терміналами, формування черги, прийом пакетів від відправника, розподілення отриманих пакетів між лазерами, з'єднання отриманих від приймачів пакетів та передачу пакетів одержувачу.

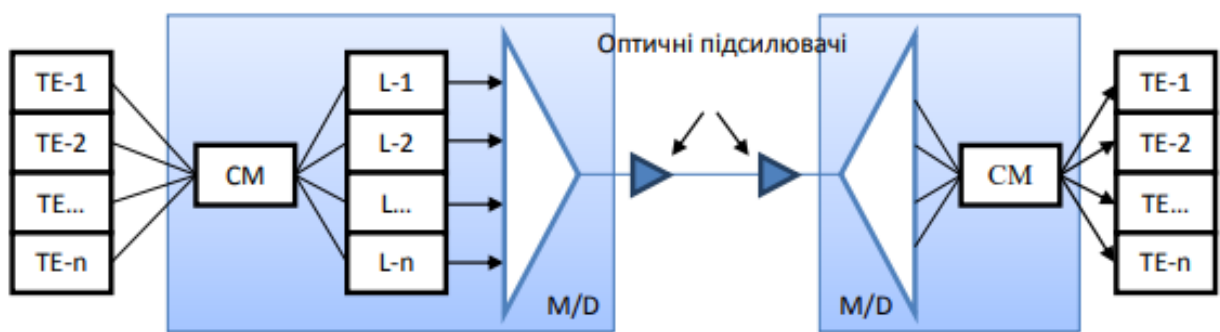


Рисунок 3.2 – Схема запропонованого методу мультиплексування

В процесі розподілу пакетів даних між передавачами, потрібно застосовувати заходи, які дозволять правильно об'єднувати розділені дані в їх початкову форму. Для цього можна використати метод інкапсуляції, додавши до кожного пакету два додаткові поля: перше поле міститиме послідовний номер частини, а друге поле буде вказувати на загальну кількість частин, на які були розділені дані.

Вибір між CWDM та DWDM залежить від кількості передавачів сигналу, яку система передачі потребує або може потребувати. Якщо кількість передавачів майже кратна збільшенню максимальної швидкості передачі інформації, то елементи CWDM можуть суттєво зменшити вартість обладнання.

Часове ущільнення в даній системі може бути реалізоване так само, як в технології GPON, з розподілом часових комірок у черзі. Кількість часових

комірок буде залежати від кількості користувачів, які в даний момент часу користуються системою, замість фіксованої кількості.

Підключення нового користувача відбуватиметься за допомогою надсилання повідомлення про підключення і отримання порядкового номеру в черзі, а відключення буде супроводжуватись надсиланням узгоджуючого повідомлення про зміну часового вікна терміналів, які знаходилися в черзі після відключеного терміналу.

Це дозволить ефективніше використовувати лінію зв'язку, уникаючи надлишкового трафіку.

Передача інформації в даній системі здійснюється методом паралелізму, де передача в груповому каналі виконується за допомогою хвильового та часового ущільнення.

Максимальна швидкість передачі групового потоку буде  $10 \cdot (\text{кількість передавачів})$  Гбіт/с, якщо максимальна швидкість при TDM без спотворення сигналу дорівнює 10 Гбіт/с.

Але це є максимальна швидкість передачі при ідеальних умовах, оскільки деякий час буде витрачатись на інкапсуляцію та декапсуляцію даних.

Таким чином, доступні два варіанти вдосконалення:

- збільшення кількості передавачів, що зображено на рисунку 3.2,
- додавання СМ (контрольного модуля), що зображено на рисунку 3.3.

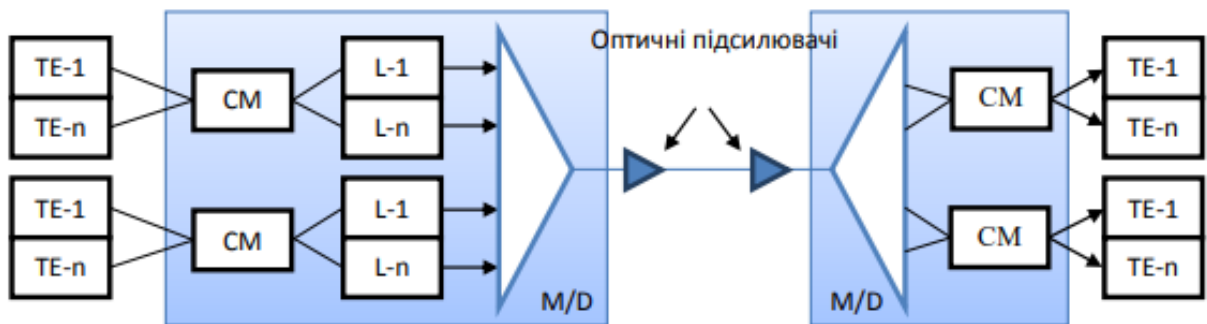


Рисунок 3.3 – Система мультиплексування, що використовується з декількома модулями контролювання

### 3.2.1 Реалізація структурної схеми

Для досягнення максимальної продуктивності цієї системи мультиплексування, слід уникнути використання пасивних розгалужувачів. Замість цього, кожному користувачеві або групі користувачів буде надано окремий оптичний канал. Забезпечення окремих оптичних каналів для кожного користувача або групи користувачів дозволяє збільшити пропускну здатність системи і запобігти змішуванню сигналів. Крім того, така структура забезпечує більшу безпеку, оскільки інформація, що передається через окремий оптичний канал, не може бути перехоплена іншими користувачами. Зображення даної структурної схеми наведено на рисунку 3.4.

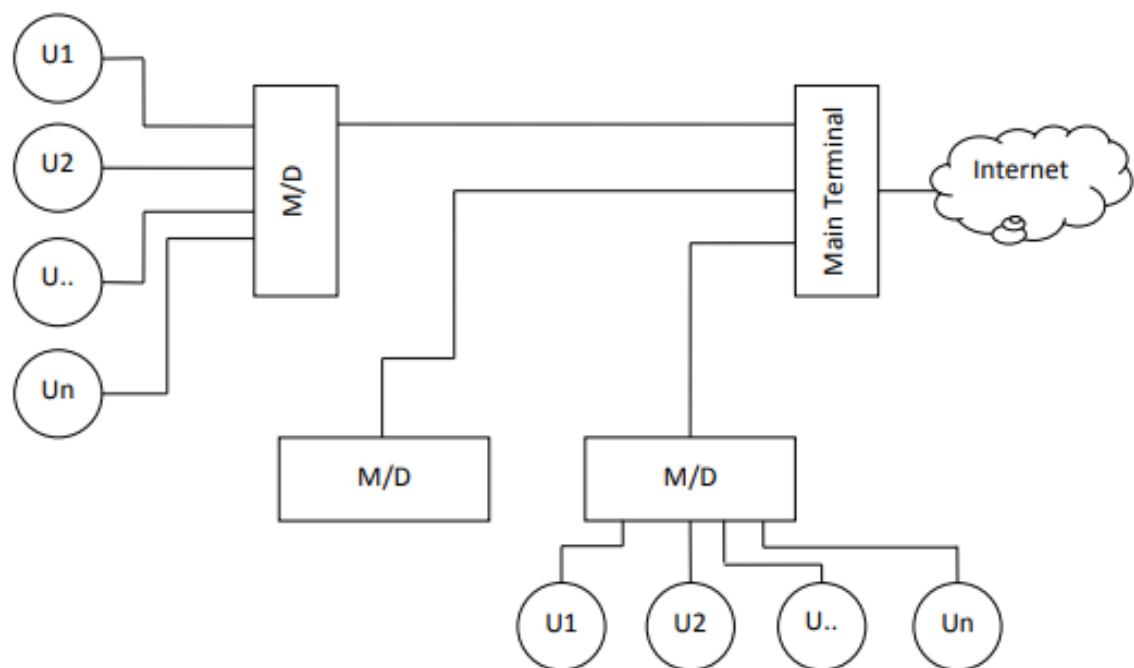


Рисунок 3.4 – Структурна схема мережі

На рисунку 3.4 можна побачити, що кожен користувач мережі має свою власну лінію, що забезпечує оптимальну швидкість передачі даних і уникнення заторів в мережі. Окрім цього, мультиплексор виконує важливу функцію буферизації даних, що дозволяє ефективно розподіляти їх між каналами та забезпечує максимальну швидкість передачі даних. Також мультиплексор передає

дані до мережевого обладнання провайдера, що забезпечує їх подальшу передачу до призначеного отримувача.

Структурна схема мультиплексора зображена на рисунку 3.5. Згідно з цією схемою, кожен користувач має свій власний оптичний канал, що дозволяє підвищити безпеку і зменшити ризик переривання зв'язку в разі збоїв. Крім того, така структура мультиплексування забезпечує високу швидкість передачі даних та можливість паралельної передачі декількох каналів інформації.

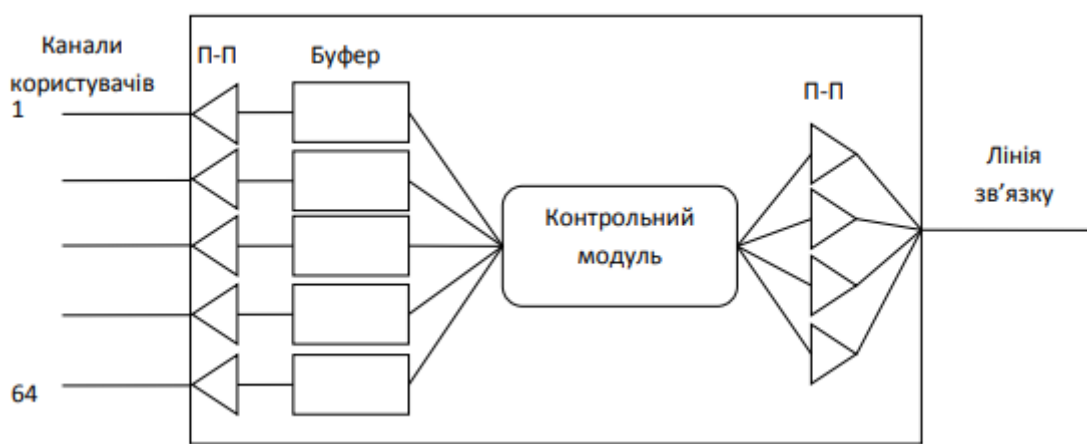


Рисунок 3.5 – Структурна схема мультиплексора

На рис. 3.5 зображені елементи системи зв'язку, що складається з приймачів-передавачів, буфера обміну та контрольного модуля.

Для забезпечення роботи системи зв'язку використовуються світлові діоди з довжиною хвилі 1550 нм для передачі від користувача до мультиплексора та довжиною хвилі 1310 нм для передачі від мультиплексора до користувача.

Для обміну даними між мультиплексором та мережевим обладнанням провайдера використовуються напівпровідникові лазери на регламентованих номінальних довжинах хвиль для CWDM або DWDM, залежно від їх кількості.

На основі вищезгаданих відомостей можна зробити висновок про те, що в залежності від потреби в передачі даних можуть використовуватися різні типи мережевого обладнання та засоби зв'язку, а також що для забезпечення роботи

мережі необхідно враховувати особливості кожного елемента та його взаємодії з іншими компонентами системи.

Крім того, важливо використовувати передові технології та стандарти, що дозволяють забезпечити швидку та надійну передачу даних у мережі.

### 3.3 Вимірювання та моніторинг

У використанні WDM систем, вимірювання можна розподілити на дві категорії: ті, які здійснюються під час будівництва системи, та ті, які проводяться під час її експлуатації. Остання категорія включає безперервний моніторинг параметрів системи, що є найважливішою складовою її функціонування.

Моніторинг систем WDM забезпечує постійний контроль стану активних каналів, щоб виявляти відхилення в оптичних характеристиках мережі та запобігати виходу системи з ладу чи погіршенню її показників якості. Такий моніторинг можна проводити за допомогою різних методів, включаючи моніторинг активних волокон, моніторинг з використанням каналу контрольного оптичного каналу (OSC), моніторинг з використанням одного з робочих каналів та моніторинг з використанням систем дистанційного тестування.

#### 3.3.1 Характеристика оптичного моніторингу

Управління SDH мережами базується на контролі цифрових параметрів, таких як BER, ESR і SESR, що вимірюються на електричному рівні в 3R регенерації. Аналогічний підхід застосовується в OTN для моніторингу з'єднань від кінця до кінця та їх з'єднань на електричному рівні. Ці методи є надійними критеріями для оцінки характеристик оптичного каналу, але не є ефективними всередині прозорих оптичних ділянок, де немає 3R регенераторів, що закінчують структуру циклу.

Таким чином, ці методи не надають достатньої інформації для виявлення першопричин виникнення проблем у DWDM мережах.

Більші швидкості передачі, більша кількість каналів і довші оптичні ділянки на мережах DWDM також збільшують вплив нелінійних явищ, що ускладнює моніторинг системи.

Для оптимальної транспортної мережі необхідно враховувати кілька підходів:

- при проектуванні мережі потрібно обмежити джерела шуму та дисперсії, щоб забезпечити мінімальну втрату сигналу;
- для знаходження пошкоджень в активних оптичних компонентах необхідно встановити відповідну систему індикації про аварії в межах мережі.

Важливо використовувати відповідний оптичний моніторинг по всій мережі, щоб виявляти аномалії, дефекти, деградацію та помилки, вимірювати шум, температуру і вологість, які можуть впливати на якість оптичного сигналу.

Методи моніторингу можуть бути класифіковані на 4 типи:

- сигналізаційний моніторинг, що охоплює відстеження часових та частотних параметрів, включаючи простий моніторинг потужності кожного каналу. Враховуйте, що ці параметри можуть бути спотворені та дисперсійні;
- моніторинг за непрямими методами, що використовують емпіричну кореляцію між аваріями обладнання та якістю сигналу. Ці методи вказують на те, що система працює, але якість сигналу погіршена, коли параметр обладнання, що випробується, знаходиться за межами нормованого діапазону;
- моніторинг з використанням вбудованого обладнання, що дозволяє дистанційно контролювати параметри мережі. Існують спеціалізовані системи моніторингу для цих цілей;
- моніторинг з використанням зовнішнього обладнання, що може бути виконано як дистанційно, так і на місцях в контрольних точках системи. Ці методи використовують рефлектометри, оптичні аналізатори спектра, тестери коефіцієнтів помилок, вимірювачі оптичної потужності для моніторингу параметрів WDM системи.

Зазвичай моніторинг систем використовується для попередження аварійного стану та забезпечення безперебійної роботи обладнання. Окрім

перелічених вище методів моніторингу, існують також інші, такі як моніторинг параметрів, що пов'язані зі зберіганням та обробкою даних, моніторинг безпеки мережі, моніторинг навантаження та інші. Також з розвитком інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту, моніторинг може бути здійснюваний за допомогою сенсорів, що вбудовані в пристрої, який моніториться. Це дає можливість збирати більше даних та аналізувати їх більш точно та ефективно.

У загальному контексті, моніторинг систем може забезпечити значний вплив на безпеку та ефективність бізнесу, технічну підтримку та задоволення клієнтів. Отже, моніторинг є важливою складовою частиною будь-якої сучасної системи.

Таблиця 3.3 – Фактори, що мають вплив на якість оптичної частини системи

Вид погіршення	Відносна частота виникнення
Загасання	Часто
Зміна оптичної потужності в каналі внаслідок вимірювання коефіцієнта підсилення в каналі	Часто
Відхилення від номіналу частоти (або довжини хвилі)	Часто
Поляризаційна дисперсія моди (PMD) (першого або вищих порядків)	Середньо
Чотирихвильове змішування (FWM)	Середньо
Підсилена спонтанна емісія (ASE). Шум в оптичних підсилювачах	Середньо
Хроматична дисперсія	Середньо
Нахил хроматичної дисперсії	Середньо
Відбиття	Середньо
Шум лазера	Середньо
Інтерференційні перехідні завади	Середньо

Кінець таблиці 3.3 – Фактори, що мають вплив на якість оптичної частини системи

Вид погіршення	Відносна частота виникнення
Перехресна фазова модуляція (ХРМ)	Рідко
Само модуляція фази (SPM)	Рідко
Вимушене Бріллюенівське розсіювання (SBS)	Рідко

Рівні відносної частоти виникнення проблем в системі залежать від частоти виникнення та важливості наслідків. Таблиця 3.3 надає такі дані:

- рідко: коли штраф  $X$  дБ може виникати тільки в одному з 10 випадків протягом року, і наслідки не є критичними;
- середньо: коли штраф  $X$  дБ може виникати в середньому один раз на рік зі значними наслідками;
- часто: коли штраф  $X$  дБ може виникати в середньому 10 разів на рік зі значними наслідками. Ці показники відносяться до стадії стабілізації системи. Штраф  $X$  дБ може виникати як у одному каналі, так і в декількох каналах.

Оптичний моніторинг включає такі параметри:

- потужність в кожному каналі;
- загальна потужність;
- коефіцієнт відношення сигнал-шум (OSNR) в каналі без значного шуму;
- Q-фактор.

3.3.2 Вимірювання параметрів оптичних компонентів за допомогою рефлектометрів

Переваги методу рефлектометрії перед іншими методами контролю параметрів оптичних компонентів полягають у:

- виміри проводяться лише на одному кінці лінії або оптичного волокна;
- є можливість визначення довжини відрізка волокна (кабелю) до місця пошкодження, таких як неоднорідності, тріщини, мікровигини;
- рефлектометр вимірює втрати на з'єднаннях і коефіцієнт зворотнього відбиття;
- рефлектометр також може проводити оцінку стану системи з плином часу, порівнюючи первинні та отримані поточні рефлектограми.

Існують три види рефлектометрів, що відрізняються за принципом дії та сферою застосування: імпульсний, частотний та брілюєнівський.

Робота рефлектометра полягає в дослідженні відбитого сигналу, який виникає внаслідок зворотного розсіювання в оптичному тракті.

Лазер подає в оптичну лінію світловий імпульс з певним періодом повторення, і прилад визначає потужність отриманого зворотного сигналу через певні проміжки часу.

Основними параметрами рефлектометра є:

- динамічний діапазон - цей показник визначається як різниця між сигналом на початку рефлектограми та середньоквадратичним значенням шумів в кінці рефлектограми. Він впливає на максимальну відстань, на яку може працювати прилад, чим він більший, тим більша відстань роботоздатності приладу;
- границі зміни тривалості імпульсу - для коротких ліній потрібні короткотривалі імпульси, оскільки сильний сплеск від роз'ємного з'єднувача при відбитті може зробити приймач приладу нечутливим. Це може призвести до «мертвої зони», тобто відстані, на якій покази приладу не можна вважати достовірними.
- Розрізняють мертві зони по відбиттю та по загасанню. Величина мертвої зони залежить не лише від тривалості імпульсу, а також і від коефіцієнта відбиття від неоднорідності та відстані до неоднорідності;
- роздільна здатність рефлектометра;

- можливість комп'ютерної обробки результатів (що дає змогу більш ефективно обробляти отримані результати).

Мертві зони рефлектометра - це ділянки поблизу відбиваючих елементів, в яких не можна достовірно проводити виміри.

Ділянку поблизу відбиваючої події, в межах якої неможливо виявити іншу відбиваючу подію, називають мертвою зоною відбиття.

Тобто, прилад не може виміряти точний рівень відбитого сигналу в цій ділянці через поглинання сигналу або згасання відбитого сигналу на шляху від об'єкта до приладу.

Розмір мертвої зони залежить від тривалості імпульсу, коефіцієнта відбиття від неоднорідностей та відстані до цих неоднорідностей.

Мертва зона загасання, з своєї сторони, визначається як відстань від початку відбиття до точки, в якій рівень сигналу фотоприймача відрізняється не більше, ніж на  $\pm 0,5$  дБ від рівня зворотного розсіювання, це зображено на рисунку 3.6.

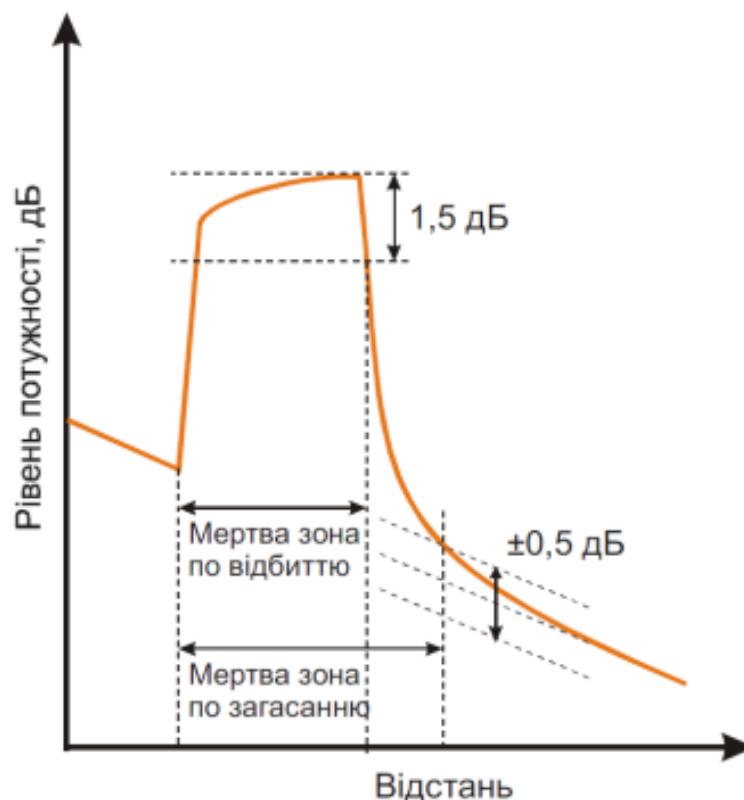


Рисунок 3.6 – Ілюстрація визначення мертвих зон

Нахил кривої на рефлектограмі відображає коефіцієнт загасання волокна в дБ, це зображено на рисунку 3.7. На ділянках, де відсутні відбиваючі або поглинаючі об'єкти, ця крива є прямою лінією зі спадаючим нахилом, що дозволяє точно визначити коефіцієнт відбиття, незалежно від того, що вимірювання здійснюється непрямо, за загасанням відбитого світла. Рефлектограма також відображає місця з'єднання волокон та точкові дефекти. Шляхом використання рефлектограми можна визначити тип та відстань до подібних неоднорідностей, а також обчислити втрати на них.

Піки на з'єднаннях виникають через френелівське розсіювання на торцях волокон, і наявність таких піків на місцях зварних з'єднань свідчить про низьку якість зварювання.

Зварні з'єднання зазвичай не є відбиваючими, і втрати на них подібні до тих, що на місцях мікровигин.



Рисунок 3.7 – Ілюстрація типової рефлектограми

Вимірювання рефлектометром в місцях з'єднань волокон різного типу може призвести до появи помилок у результаті обробки даних які зумовлені

відмінністю коефіцієнтів зворотного розсіювання з'єднаних волокон, що зображено на рисунку 3.8. Відмінність цих коефіцієнтів може призвести до різниці між вимірними та реальними втратами на з'єднанні волокон, яка становитиме різницю коефіцієнтів зворотного розсіювання в дБ. Наприклад, з'єднання ділянок I та II може виглядати як ділянка з підсиленням сигналу, тоді як з'єднання II та III може виглядати як ділянка з втратами, які перевищують їхню реальну величину. Використання двох рефлектограм може забезпечити більш точні результати вимірювань у випадку різних коефіцієнтів зворотного розсіювання.

Для отримання правильних результатів вимірювання втрат на з'єднанні волокон за допомогою рефлектометра необхідно, щоб коефіцієнти зворотного розсіювання двох волокон були рівними. У випадку, коли вони різняться, результати вимірювань потрібно скоригувати або використовувати дві рефлектограми, зняті з протилежних кінців, для отримання більш точного результату. В такому випадку втрати на з'єднанні дорівнюватимуть півсумі вимірів з двох рефлектограм, знятих з різних кінців.

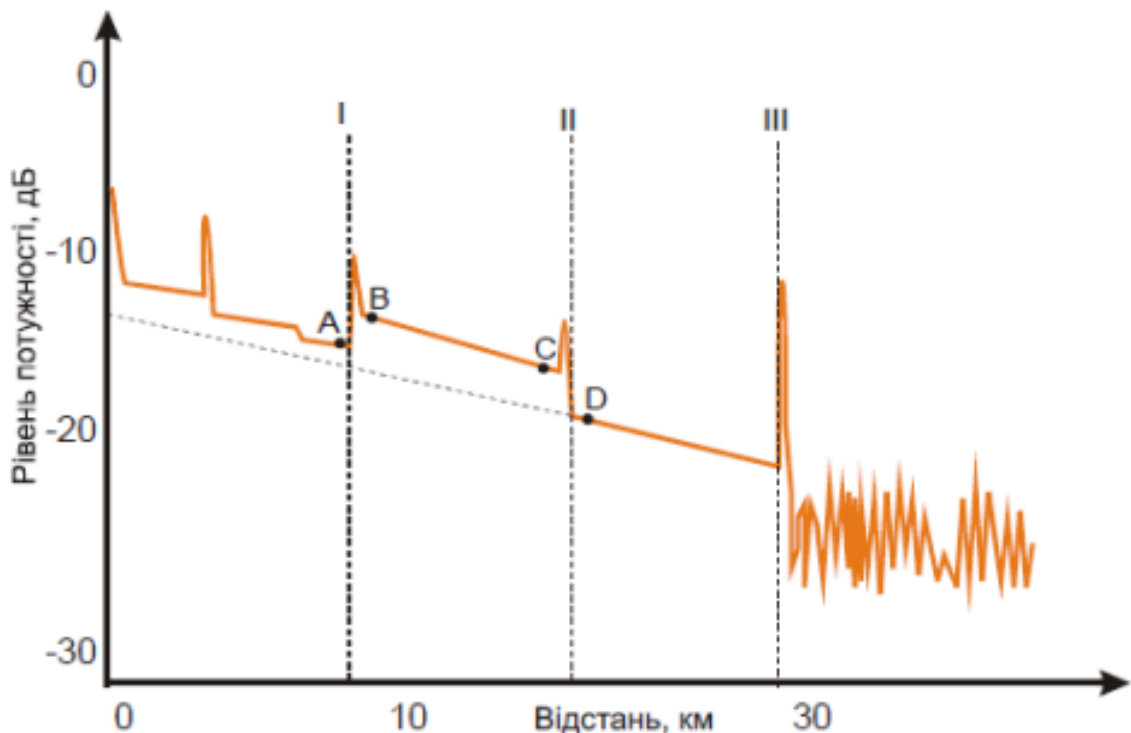


Рисунок 3.8 – Приклад появи неточностей під час аналізу рефлектограм

Метод частотно-модульованого зондування (OFDR) застосовує безперервний сигнал, частота котрого промодульована, для вимірювання зміни зондуючого сигналу вздовж волоконного тракту. Оптичний рефлектометр на основі ефекту Рейлі, використовується для оцінки якості оптичного кабелю. Цей прилад вимірює відношення потужності відбитого сигналу до вихідної потужності, яка надсилається в оптичне волокно. Таким чином, можна виявити проблемні ділянки волокон, де втрата сигналу найбільша.

Оптичний рефлектометр має джерело світла, яке відправляється в оптичний кабель через порт вводу. Сигнал, який відбивається від кінця кабелю, повертається назад і пройшовши через спеціальний приймач, записується на екрані. Відстань до дефектів волокон може бути визначена шляхом виміру часу, потрібного для проходження світла до точки відбиття та повернення до детектора.

Щоб забезпечити точність вимірів, рефлектометр потребує регулювання. Спочатку вимірюється потужність відбитого сигналу без будь-яких дефектів в кабелі. Потім, прилад залучається до кінця кабелю та вимірюється потужність відбитого сигналу від зондуючого сигналу на різних відстанях. Коли знайдено зону, де відбитий сигнал знижується, то можна зробити висновок про те, що волокно знаходиться в цій зоні поганої якості.

Отже, обидва методи дозволяють виявити проблеми в оптичних волокнах, але використовують різні підходи.

### 3.4 Висновки до розділу

На сьогоднішній день, найбільш поширені технології серед пасивних оптичних мереж є GPON, EPON (GEPON) та 10GEPON. Швидкість передачі інформації за допомогою цих технологій складає від 1 до 10 Гбіт/с. Хоча пасивні оптичні мережі досить прості у встановленні, експлуатації та обслуговуванні, технологія PON має недолік – незахищеність інформації. Це означає, що всі ONU

отримують інкапсульовану інформацію всіх станцій, але кожен ONU передає користувачеві лише його власну інформацію.

Сучасні WDM системи також мають високу швидкість передачі інформації – 1-10 Гбіт/с (а окремі до 40 Гбіт/с) і можуть забезпечити до 160 каналів передачі інформації. Однак, організація HWDM та HDWDM систем потребує значної кількості точного апаратного забезпечення, що вимагає високої вартості обладнання та постійного моніторингу та обслуговування.

Було запропоновано альтернативний метод мультиплексування, який працює на основі WDM та TDM, але зі значними змінами. У цій системі всі канали, що розділені за довжиною хвилі, працюють як один. Це означає, що пакетні дані одного користувача рівномірно розподіляються між усіма передавачами, передаються та з'єднуються у їх первинний вигляд. Технологія TDM використовується для передачі сигналів від ONU до OLT у пасивних оптичних мережах. У даному випадку, дані кожного користувача будуть передаватись у відведений для них часовий інтервал. Часовий інтервал і послідовність передачі будуть розподілятися за домовленістю, тобто черга буде формуватись лише з активних користувачів. Ця технологія мультиплексування може бути застосована як для створення оптичних мереж, так і для передачі інформації в магістральних лініях зв'язку. Використання даної технології дозволить багатократно збільшити максимальну швидкість передачі групового потоку інформації. Пропонована система мультиплексування працює на основі принципів WDM і TDM, але з деякими відмінностями. Всі канали, що розділені за довжиною хвилі, працюють як один, тобто пакетні дані одного користувача рівномірно розподіляються між усіма передавачами, передаються та з'єднуються у їх первинний вигляд.

## 4 МАЙБУТНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ТЕХНОЛОГІЇ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ В ОПТИЧНИХ КАБЕЛЯХ

### 4.1 Аналіз ефективності застосування мультиплексування в оптичних кабелях PON та WDM

Аналіз ефективності застосування мультиплексування в оптичних кабелях PON та WDM полягає в порівнянні цих двох технологій з точки зору ефективності передачі даних. Для цього можна порівняти їх пропускну здатність, вартість та складність обладнання, які вони вимагають.

Основна ідея аналізу ефективності застосування мультиплексування в оптичних кабелях PON (Passive Optical Networks) та WDM (Wave Division Multiplexing) полягає в тому, як використання різних методів мультиплексування може покращити продуктивність та ефективність передачі даних в оптичних мережах.

PON - це тип оптичних мереж зв'язку, де використовуються пасивні елементи для передачі сигналів до кінцевих користувачів.

WDM - це технологія мультиплексування, яка дозволяє передавати кілька сигналів по одному оптичному волокні шляхом використання різних хвильових довжин.

#### 4.1.1 Швидкість передачі даних

Швидкість передачі даних в PON та WDM залежить від багатьох факторів, таких як кількість абонентів в мережі, використовувані протоколи передачі даних, тип оптичного кабелю та інші.

У зв'язку з цим, швидкість передачі даних в PON зазвичай обмежена до 1,25 Gbps або 2,5 Gbps на один порт, що вистачає для забезпечення послуг, таких як Інтернет, телефонія та телебачення.

З іншого боку, WDM дозволяє передавати дані на кількох довжинах хвиль, що дозволяє досягти вищої швидкості передачі даних. Швидкість передачі даних

в WDM залежить від кількості довжин хвиль, які використовуються, а також від кількості каналів на кожній довжині хвилі.

Наприклад, WDM з 8 довжинами хвиль може досягати швидкості передачі даних до 10 Gbps на канал, що дає загальну пропускну здатність до 80 Gbps. WDM з 40 довжинами хвиль може досягати швидкості передачі даних до 400 Gbps.

Отже, WDM зазвичай надає вищу швидкість передачі даних порівняно з PON, але використання конкретної технології залежить від потреб мережі та можливостей її реалізації.

Аналіз ефективності включає вивчення різних аспектів, таких як потужність сигналу, швидкість передачі даних, довжина волокна, кількість користувачів та інші параметри, що зображено на рисунку 4.1. Дослідники вивчають різні методи мультиплексування, такі як WDM, де використовуються різні хвильові довжини для передачі сигналів до різних користувачів, або TDM, де використовується розділення за часом.

Ці дослідження можуть включати теоретичний аналіз, моделювання та експериментальні дослідження, щоб оцінити ефективність застосування мультиплексування в оптичних мережах PON та WDM, визначити їх переваги та недоліки, та визначити оптимальні режими роботи для різних сценаріїв застосування. У результаті порівняння виявилось, що системи WDM мають більшу пропускну здатність та можуть передавати дані на відстань до 100 км, тоді як PON мають обмеження на відстань до 20 км. Крім того, WDM дозволяє обслуговувати більшу кількість користувачів, що робить його більш ефективним для великих мереж.

В дослідженні було виявлено, що PON є однією з найбільш ефективних технологій мультиплексування, яку можна використовувати для організації оптичних мереж. PON використовує мультиплексування часових слотів для передачі даних, що дозволяє передавати різні сигнали по одному оптоволоконному кабелю.

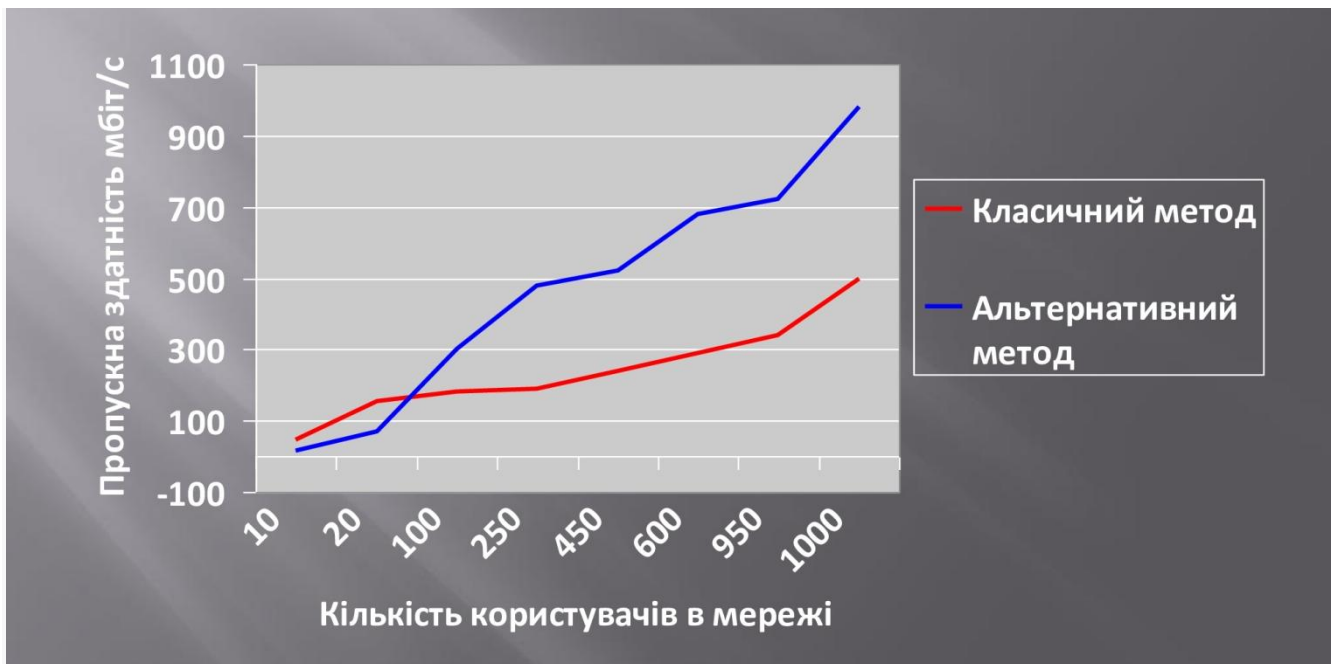


Рисунок 4.1 – Аналіз ефективності застосування альтернативного методу мультиплексування

На цьому графіку можна побачити, що швидкість передачі даних в оптичних кабелях з використанням WDM може досягати значно вищих значень порівняно з PON на великих відстанях передачі сигналу. Крім того, на інших графіках можна побачити порівняння параметрів, таких як відстань передачі, кількість підключених користувачів та інші характеристики. При аналізі порівнювалися різні параметри ефективності систем PON та WDM. Основні з них - швидкість передачі даних, відстань передачі, кількість користувачів, які можуть бути обслуговані одночасно та вартість установки та підтримки системи.

Також було виявлено, що система WDM вимагає більш високої вартості установки та підтримки порівняно з PON, але на довгострокову перспективу може бути більш ефективною і економічно вигідною, оскільки має більшу пропускну здатність та можливість обслуговування більшої кількості користувачів.

Аналізуючи результати досліджень, можна зробити висновок, що для збільшення пропускну здатності оптоволоконних ліній передачі інформації, краще використовувати технологію WDM. Це пов'язано з тим, що WDM дозволяє

передавати різні сигнали по різних довжинах хвиль, що забезпечує більшу швидкість передачі даних.

В дослідженні було виявлено, що PON є однією з найбільш ефективних технологій мультиплексування, яку можна використовувати для організації оптичних мереж. PON використовує мультиплексування часових слотів для передачі даних, що дозволяє передавати різні сигнали по одному оптоволоконному кабелю.

Також було розроблено структурну схему альтернативної системи мультиплексування сигналу, яка працює за принципом WDM та TDM, але з використанням принципу паралелізму. Ця система дозволяє збільшувати пропускну здатність групового каналу за потребою, встановленням додаткового апаратного обладнання (передавачів/приймачів).

Отже, з дослідження можна зробити висновок, що мультиплексування є важливою технологією для підвищення ефективності передачі інформації в оптичних кабелях, і що використання технології WDM може бути більш бажаною технологією, ніж PON.

## 4.2 Порівняння TDM і WDM у PON

TDM і WDM є двома різними технологіями мультиплексування в оптичних мережах. В PON використовуються обидві технології для передачі даних від центрального офісу до кінцевих користувачів.

У TDM (Time Division Multiplexing) кожен користувач має відведений часовий інтервал для передачі даних, що означає, що кожен користувач використовує канал передачі даних виключно на певний час. Таким чином, кожен користувач має відведену окрему «смужку» для передачі даних [48, с. 573].

У WDM (Wavelength Division Multiplexing) різні користувачі використовують різні хвильові довжини для передачі даних, що означає, що кожен користувач використовує свій власний оптичний канал. Таким чином, різні

користувачі можуть одночасно передавати дані через один і той же оптичний кабель, використовуючи різні хвильові довжини.

У WDM (Wave Division Multiplexing), кожен канал використовує світлову хвильову довжину, що дозволяє передавати дані з різних каналів безпосередньо і одночасно. Це означає, що використання WDM у PON дозволяє передавати дані з високою пропускнуою здатністю без затримок, пов'язаних з TDM.

У TDM (Time Division Multiplexing), кожен канал використовується по черзі з високою частотою, так що на перший план виходить передача даних одного каналу, після чого йде передача даних наступного каналу. Цей процес повторюється для кожного каналу з високою швидкістю, що дозволяє передавати дані з високою пропускнуою здатністю. Однак, використання TDM в PON може створювати певні проблеми, такі як затримки, викликані необхідністю чекати на світлові сигнали з кожного каналу.

За результатами досліджень, WDM зазвичай вважається більш ефективною технологією в порівнянні з TDM, оскільки дозволяє передавати більшу кількість даних одночасно та зменшує час очікування для користувачів. Однак, WDM-технологія вимагає більш високої якості обладнання та витрат на установку. У залежності від конкретної ситуації, може бути вигіднішим використовувати TDM або WDM в PON. У багатьох частинах світу PON ще знаходяться на початкових стадіях впровадження. Хоча вони забезпечують більшу пропускну здатність, ніж традиційні мережі доступу на основі міді, необхідне подальше збільшення їх пропускнуої здатності. Це можливо завдяки використанню мультиплексування з поділом довжини хвилі (WDM), що дозволяє підтримувати декілька довжин хвиль в одному або обох напрямках висхідного та низхідного потоку. Така PON називається WDM-PON, і її архітектури були запропоновані ще в середині 1990-х років, концепція переходу з TDM на PON зображена на рисунку 4.2. Однак, наразі ці ідеї ще не були комерціалізовані з ряду причин, включаючи відсутність ринку, недосконалість технологій кінцевих пристроїв та відсутність відповідних мережевих протоколів та програмного забезпечення для підтримки архітектури.

Традиційні однохвильові PON (тобто мультиплексовані PON з розподілом по часу (TDM-PON) поєднують у собі високу ємність, що забезпечується оптичним волокном, з низькими витратами на встановлення та обслуговування пасивної інфраструктури.

WDM має кілька переваг порівняно з TDM. Наприклад, завдяки WDM користувач завжди має свою окрему смугу, а сигнали абонентів фізично ізольовані. Крім того, WDM-PON ефективно використовує волокно, дозволяючи до 64 абонентів на волокно, як і в GPON. Також можна збільшити дальність зв'язку до 80 км, що є значним покращенням порівняно з звичайним PON, де дальність зв'язку складає лише 20 км.

Однак, недоліком WDM-PON є висока вартість на початковому етапі, оскільки потрібні вузькосмугові передавачі, що випромінюють на заданій довжині хвилі. Хоча TDM має меншу початкову вартість, вона має більш високу кінцеву вартість.

Стресостійкість є не менш важливим параметром для мереж PON і WDM, ніж швидкодія та вартість, оскільки збої в мережі можуть призвести до втрати сигналу і відключення підключених клієнтів.

Залежно від рівня стресу, який виникає в оптичній мережі, можуть виникати різні проблеми, які можуть впливати на її надійність та продуктивність. Тому важливо розуміти, які заходи можна прийняти для забезпечення найвищого рівня стресостійкості в мережах PON та WDM.

Один з підходів до забезпечення стресостійкості полягає у використанні надійного обладнання та технологій, таких як резервування. Наприклад, в PON мережах можуть бути використані резервні оптичні лінії та жорсткі диски для забезпечення надійної роботи мережі у випадку виникнення проблем з основними елементами мережі.

У WDM мережах можна використовувати такі технології, як забезпечення повторного використання світлового сигналу, зменшення втрат та інші. Крім того, можна використовувати різні механізми для забезпечення надійної роботи мережі,

такі як контроль якості сигналу, перевірка наявності інших сигналів на каналі та багато іншого.

Загалом, важливо розуміти, що стресостійкість мережі залежить від багатьох факторів, таких як якість обладнання, використані технології, резервування та інші. Тому для забезпечення найвищого рівня стресостійкості необхідно використовувати комплексний підхід та розглядати кожен складову мережі окремо.

В мережах PON зазвичай використовуються оптичні спліттери, які розділяють сигнал на кілька каналів для передачі до підключених клієнтів. Оскільки кількість каналів обмежена, може виникнути проблема забруднення оптичного спліттера, яка може призвести до зниження сигналу або його повної втрати. Однак, у мережах PON існують методи діагностики і локалізації забруднення спліттера, що допомагає зменшити час відключення клієнтів та швидше відновити роботу мережі.

У мережах WDM використовуються різні канали для передачі сигналу на різних довжинах хвиль. Оскільки різні довжини хвиль мають різний ступінь затухання в оптичному кабелі, можуть виникнути проблеми з нерівномірним затуханням різних каналів. Це може призвести до перекриття сигналів і зниження пропускної здатності. Однак, у мережах WDM також існують методи корекції затухання сигналу та моніторингу якості сигналу, що допомагає забезпечити стабільну роботу мережі.

Отже, обидві технології мають свої переваги та недоліки щодо стресостійкості, і успішність мережі залежить від ефективності методів діагностики, локалізації і корекції збоїв.

При розробці нової мережі доступу оператор повинен враховувати багато параметрів, таких як пропускна здатність мережі, можливість подальшого масштабування та вартість. Аналізуючи ці параметри, виявляється, що WDM-PON є більш доцільним вибором, оскільки вона випереджає TDM-PON по кожному з наведених параметрів.

Оптична несуча розподіляється за допомогою пасивного роздільника між усіма абонентами.

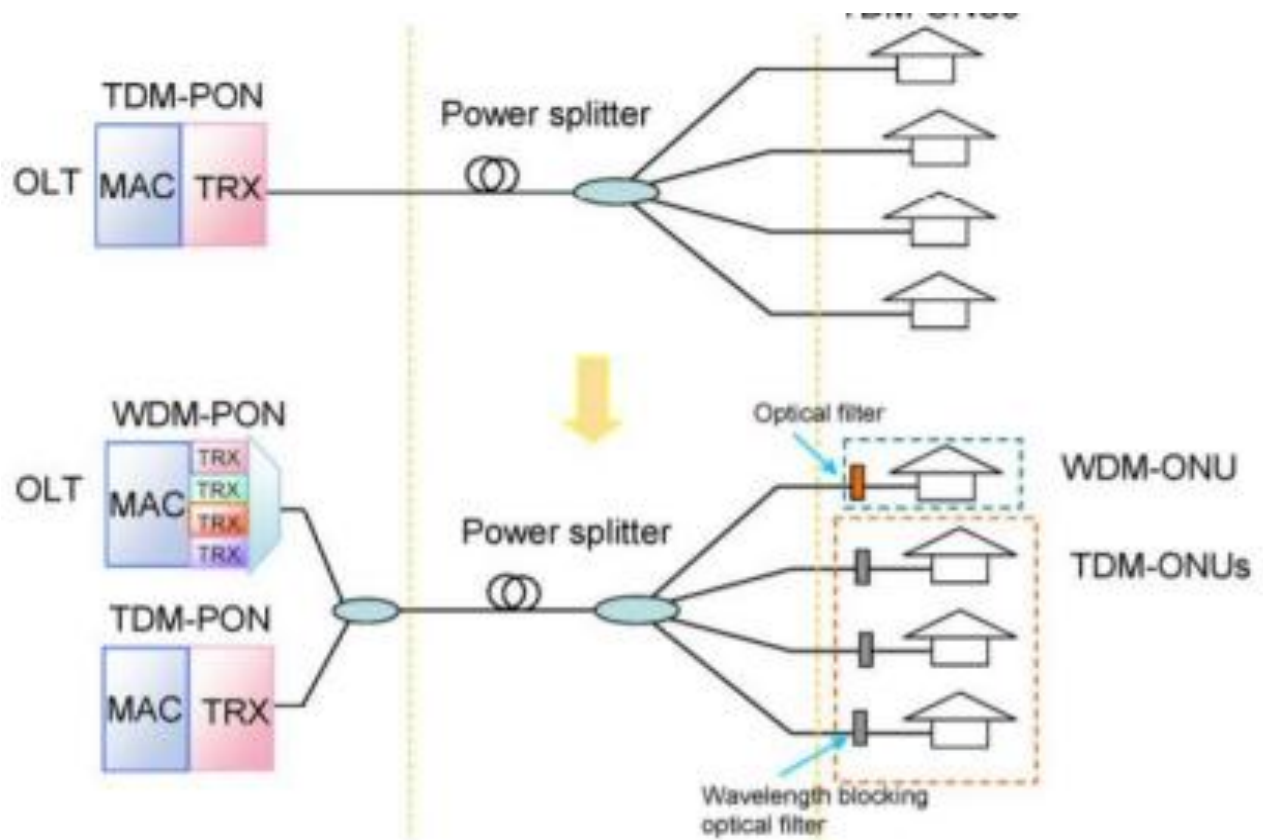


Рисунок 4.2 – Ілюстрація переходу з TDM на WDM

Особливості, що були описані раніше, подано в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Аналіз різних архітектур WDM

	CPON	LARNET	RITENE T	Multi-Stage	Super-PON	Success-DWA
Основна мета архітектур	Основна система на основі AWG	Зменшити вартість ONU	Зменшити вартість ONU	Масштабований глобальний сервіс PON	Служба міжміського сполучення	Масштабований приріст пропускної спроможності PON

Кінець таблиці 4.1 – Аналіз різних архітектур WDM

	CPON	LARNE T	RITENE T	Multi-Stage	Super-PON	Success-DWA
Спільне використання воловня	Висхідний/низхідний спільно або окремо	Висхідний/низхідний спільно	Висхідний/низхідний окремо	Залежить від варіанту висхідного потоку	Висхідний/низхідний спільно	Висхідний/низхідний спільно
Спільне використання довжини хвилі	низхідний	I <sub>μ</sub> / ONU	I <sub>μ</sub> / ONU	Висхідний/низхідний спільно(TDMA, спільне розміщення)	Спільно(TDMA)	-Спільний між ONU - Висхідний спільно
	висхідний	Спільно(TDMA)	Спільно(TDMA, CSMA/CD)		Спільно(TDMA)	
Масштабованість	низький	низький	низький	добрий	добрий	відмінний
Вартість терміналу користувача(ONU)	низька(DFB LD)	нормальна(LED)	нормальна	Залежить від варіанту висхідного потоку	низька	низька
Вартість розгортання	нормальна	нормальна	низька	дуже низька	нормальна	низька
Відстань	середня	низька	дуже низька	середня	відмінна (~ 100 км)	середня

Незалежно від конкретних і точних значень, можна зробити висновок, що TDM має меншу початкову вартість (тобто є дешевшим при низькій пропускну здатності), але вищу кінцеву вартість (тобто існує точка беззбитковості), що

можна побачити на рисунку 4.3.

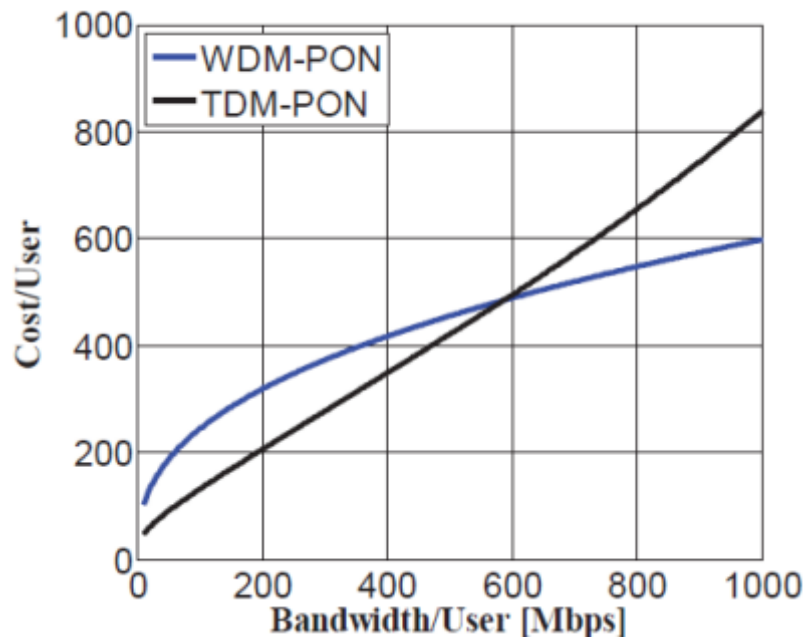


Рисунок 4.3 – Порівняння TDM і WDM у PON

#### 4.3 Порівняння вартості архітектур та складності обладнання

Розглядаючи кількість оптичних одиниць мережі, які необхідно підключити, та кількість довжин хвиль, що потрібно передавати зі станційного обладнання, ми можемо проектувати всі можливі варіанти архітектури, змінюючи кількість рівнів, кількість WGR на кожному рівні, їх розмір, кількість використаних входів та грубість WGR.

Наша мета полягає у визначенні найбільш оптимальних комбінацій параметрів, які дозволяють мінімізувати вартість. Для досягнення цієї мети можуть використовуватись різні методи аналітичної оптимізації, такі як цілочисельне лінійне програмування та інші методи. Однак, оскільки набір можливих мережевих варіантів є відносно невеликим, було вирішено створити всі можливі мережі та знайти найбільш оптимальний вибір параметрів шляхом порівняння витрат.

Для генерації всіх можливих комбінацій параметрів мережі для заданого значення було використано рекурсивний алгоритм.

Єдиними обмеженнями, які є необхідними, є максимальний та мінімальний розмір, допустимий для WGR.

Останній параметр було додано для того, щоб уникнути мережевих архітектур із занадто малими віддаленими вузлами та зменшити кількість можливих архітектур, які можуть бути згенеровані.

Алгоритм починається з генерації першого етапу мережі та рекурсивно генерує наступні етапи, вибираючи набір параметрів, які задовольняють певні межі.

Коли алгоритм досягає кінця мережі, він перевіряє, чи задовольняє отримана мережа усі вимоги щодо продуктивності та якості зв'язку, задані користувачем.

Якщо так, то мережа додається до списку прийнятних мереж. Якщо ні, то алгоритм переходить до наступного набору параметрів.

Для покращення ефективності алгоритму було розроблено кілька оптимізацій.

Наприклад, якщо відстань між вузлами перевищує максимально допустиме значення, то алгоритм не буде рекурсивно генерувати комбінації параметрів для цього вузла. Замість цього, алгоритм перейде до генерації наступного етапу мережі.

Додатково, для скорочення часу роботи алгоритму було використано паралельне обчислення.

Кожен набір параметрів обробляється окремим процесом, що дозволяє ефективно використовувати ресурси комп'ютера.

Отримані результати дозволили визначити найбільш оптимальні мережеві архітектури для заданих параметрів мережі та різних вимог до продуктивності та якості зв'язку.

Цей алгоритм може бути корисним для проектування та побудови мережі, яка задовольняє певні вимоги. У даному дослідженні розглядалася вартість

доступних на ринку комерційних пристроїв. Майбутнє збільшення обсягів виробництва може призвести до зниження вартості виробництва WGR, оскільки ці пристрої стають все популярнішими як будівельні блоки оптичних мереж і систем.

Друга функція витрат враховує вартість кабелів та їх монтаж. Вартість кабелю для простоти вважається незалежною від кількості волокон, які він може містити. Вартість монтажу включає вартість кабелю та експлуатації траншеї.

Однак наша оцінка вартості не враховує повторне використання кабелю, що може призвести до завищення витрат, якщо проект глобальної мережі з більшою кількістю PON повинен бути виконаний.

Оцінка загальної вартості зв'язку вимагає знання відстані всіх кабельних зв'язків у багатоступінчатому WDM-PON.

Але ця інформація важко отримати, оскільки досі не існує комерційних установок багатоступінчастих WDM-PON.

Тому було використано дані щодо TDM-PON та моделі фізичної архітектури мережі доступу на основі міді для оцінки вартості міжетапних зв'язків в багатоступінчастому WDM-PON.

Наша оцінка враховує, що WGR багатоступінчастого WDM PON можуть бути встановлені в місцях, де зараз розміщені точки поділу кабелів.

В організаційно-економічній частині магістерської роботи було проведено розрахунки основних техніко-економічних показників, що стосуються дослідження особливостей та характеристик мультиплексування та частотного розділення сигналу в оптичному кабелі, це зображено в таблиці 4.2.

Отримане значення економічної ефективності дорівнює 0,56, що є досить високим показником.

Також нормальним вважається термін окупності, який зазвичай становить від 1 до 3 років.

Якщо термін окупності коливається в межах цих значень, то розробка є доцільною та економічно вигідною.

Для даного продукту термін окупності складає приблизно 2 роки, що є прийнятним значенням.

Таблиця 4.2 – Аналіз економічної ефективності

№ п/п	Показник	Значення
1.	Собівартість, грн.	~ 1260
2.	Плановий прибуток, грн.	~ 706
3.	Ціна, грн.	~ 1968
4.	Економічна ефективність	~ 0,56
5.	Термін окупності, рік	~ 2

4.4 Забезпечення надійного захисту програмного забезпечення від можливих надзвичайних ситуацій

Програмне забезпечення – це сукупність програм та документів системи обробки інформації, необхідних для використання цих програм. Основна мета будь-якого програмного забезпечення полягає в обробці інформації та керуванні апаратними компонентами комп'ютера. Однак, головною загрозою для програмного забезпечення, яка може завадити його належному функціонуванню або знищити його, є комп'ютерні віруси. Для ефективного протидії вірусам необхідно розуміти їх властивості та знати методи боротьби з ними.

Вірус - це спеціально створена програма, яка може поширюватися самостійно в комп'ютерному середовищі. Якщо вірус потрапить на комп'ютер разом з однією з програм або файлом документа, то через певний час інші програми або файли на цьому комп'ютері також можуть бути заражені. У разі підключення комп'ютера до локальної або глобальної мережі, вірус може поширитися й на інші комп'ютери. Автори вірусних програм створюють їх з різних мотивів, але результати їх дії, як правило, схожі - вони можуть пошкодити програми та документи на комп'ютері, що часто призводить до втрати даних.

Деякі віруси можуть навіть повністю знищити всю інформацію на дисках комп'ютерів, вартість якої може перевищувати вартість самого комп'ютера в кілька десятків або сотень разів.

Можна застосовувати різні заходи для захисту від вірусів, зокрема:

- використання загальних засобів захисту інформації, які можуть бути корисними не лише для захисту від вірусів, але й для захисту від фізичного знищення даних на дисках, помилкових дій користувачів чи неправильної роботи програм;
- проведення профілактичних заходів для зменшення ймовірності зараження вірусом;
- використання спеціалізованих програм для захисту від вірусів.

Загальні засоби захисту інформації можуть мати дві основні форми:

- копіювання інформації, яке включає створення копій файлів та системних областей дисків;
- розмежування доступу, що запобігає несанкціонованому використанню інформації, включаючи захист від змін програм і даних вірусами, неправильно працюючими програмами та помилковими діями користувачів.

Існують три рівні захисту від комп'ютерних вірусів:

- запобігання надходження вірусів;
- запобігання вірусної атаки, якщо вірус все-таки потрапив на ПК;
- запобігання руйнівних наслідків, якщо атака вже сталася.

Захист від вірусів можна реалізувати за допомогою трьох методів:

- програмні засоби захисту;
- апаратні методи захисту;
- організаційні методи захисту.

Захист інформації можна забезпечити за допомогою резервного копіювання найцінніших даних. Якщо інформація втрачається, жорсткі диски переформатовують і готують до нової роботи. До відформатованого диску встановлюється програмне забезпечення з дистрибутивних носіїв, а потім з нього відновлюються дані, що були збережені на резервних носіях. При резервному

копіюванні необхідно окремо зберігати реєстраційні та паролльні дані для доступу до мережних служб Інтернету. Місце зберігання може бути службовим щоденником у сейфі керівника підрозділу. Резервні копії повинні зберігатися окремо від ПК, щоб забезпечити їх безпеку. Крім того, можна зберігати неконфіденційні дані у Web-папках на видалених серверах в Інтернеті. Конфіденційні дані слід зберігати на зовнішніх носіях, які зберігають у сейфах, бажано в окремих приміщеннях. Резервні копії необхідно зберігати в різних місцях та здійснювати ротацію між ними.

Допоміжними засобами захисту інформації можуть бути антивірусні програми та засоби апаратного захисту, наприклад, відключення перемикача на материнській платі, що не дозволить здійснити стирання мікросхеми ПЗУ (флешBIOS). Незважаючи на важливість загальних засобів захисту інформації, що допомагають захиститися від вірусів, їх самостійного застосування недостатньо. Для ефективного захисту від вірусів також потрібно використовувати спеціалізовані програми. Ці програми можна класифікувати на кілька видів: детектори, доктори (фаги), ревізори (програми контролю змін у файлах і системних областях дисків), доктори-ревізори, фільтри (резидентні програми для захисту від вірусів) і вакцини (імунізатори).

Програми-детектори дозволяють виявляти файли, заражені одним з відомих вірусів.

Програми-доктори, або фаги, «лікують» заражені програми або диски, видаляючи з заражених програм тіло вірусу, тобто відновлюючи програму в тому стані, в якому вона перебувала до зараження вірусом.

Програми-ревізори спочатку запам'ятовують відомості про стан програм і системних областей дисків, а потім порівнюють їх стан з початковим. При виявленні невідповідностей користувачу повідомляється про це.

Доктори-ревізори – це гібриди ревізорів та докторів, тобто програми, які не тільки виявляють зміни у файлах і системних областях дисків, а й можуть автоматично повертати їх у початковий стан у разі змін.

Програми-фільтри розташовуються резидентно в оперативній пам'яті комп'ютера і перехоплюють звернення до операційної системи, які використовуються вірусами для розмноження і нанесення шкоди, і повідомляють про них користувачеві.

Імунізатори або програми-вакцини змінюють програми та диски таким чином, що це не впливає на їх роботу, але вірус, проти якого було створено вакцину, розглядає ці програми та диски як заражені. Ці програми стають надієвими та не використовуються.

До апаратних засобів захисту від вірусів належать мережеві екрани (брандмауери, файерволи). Ці прилади були розроблені для перевірки пакетних даних, які користувач отримує з локальної або глобальної мережі. Мережевий екран підключається перед мережевою картою та блокує вірусні програми, запобігаючи їх потраплянню на жорсткий диск.

Захист програмного забезпечення від вірусних програм є важливою та необхідною процедурою для забезпечення ефективної та правильної роботи комп'ютерної системи. Оскільки позбутись вірусних програм буває складно і це може зайняти багато часу, слід дотримуватись профілактичних заходів. Найкращим методом захисту є встановлення мережевого екрану та програмних антивірусних засобів, які запобігають потраплянню вірусів на комп'ютер.

#### 4.5 Використання мультиплексування в мережах 5G

При використанні послуг мультиплексування 4G, 5G та Wi-Fi, важливо звернути увагу на питання зменшення випромінювання, як внутрішньосмугового, так і позасмугового, щоб забезпечити безпеку користувачів. Однак, щоб забезпечити якісний зв'язок у технології 5G, використання масивного MIMO та балочного рульового керування є важливими факторами. Ці технології забезпечують більшу пропускну здатність каналу, що дозволяє передавати більше даних через повітряний інтерфейс. Просторове мультиплексування та розширений

зворотний зв'язок каналу також допомагають покращити пропускну здатність та ефективність передачі даних.

Зв'язок 5G має ще один важливий аспект - зменшення часу затримки, відомого як «лаг» (latency). Це означає, що дані можуть передаватися майже миттєво, що є критично важливим для багатьох застосувань 5G, таких як мережі Інтернету речей (IoT), дистанційні операції та безпілотні транспортні засоби. Зменшення часу затримки до 1 мілісекунди або менше є ключовим аспектом розвитку технології 5G.

Додатково варто зазначити, що ще однією перевагою технології мультиплексування є можливість передавати різні типи даних по одному фізичному каналу. Наприклад, в оптичних кабелях WDM можна передавати одночасно голосові, відео та інтернет-трафік. Також можна зменшити витрати на інфраструктуру і забезпечити більш ефективне використання ресурсів. Крім того, технологія MIMO також може забезпечити більшу ефективність спектру та зменшення перешкод, що дозволяє передавати дані на відстань, що далеко перевищує можливості попередніх поколінь мобільних мереж.

Такі можливості 5G є важливими для розвитку різноманітних інноваційних застосувань, таких як автономні автомобілі, дистанційні медичні консультації та дистанційне навчання. Зараз багато компаній розробляють різноманітні додатки та рішення, які використовують можливості 5G. Однак, важливо пам'ятати, що 5G є досить новою технологією, і його широкомасштабний розвиток може зайняти деякий час.

#### 4.6 Висновки до розділу

В ході аналізу було виявлено, що у довгостроковій перспективі майбутнє PON полягає в застосуванні технології WDM, яка використовує хвильову сітку DWDM для передачі великої кількості паралельних високошвидкісних каналів на одній PON-структурі. WDM є альтернативою схемі передачі, заснованій на поділі в часі. У WDM ONT передає і приймає дані на певній довжині хвилі. В мережі

передається загальний потік, а на кожному абонентському терміналі є оптичний фільтр для виділення своєї довжини хвилі.

WDM - це технологія мережі доступу, яка може істотно змінити інфраструктуру операторів зв'язку. Вона створює логічну архітектуру точка-точка на основі довжини хвилі за фізичної волоконно-оптичної топології точка-багатоточка. Вона використовує технологію WDM мультиплексування і/або демультиплексування, щоб гарантувати, що сигнали даних можуть бути розділені на окремі вихідні сигнали, які підключаються до будівель або домівок. Такий поділ трафіку на основі апаратних засобів надає клієнтам переваги безпечної і масштабованої лінії зв'язку точка-точка по довжині хвилі, але дозволяє оператору підтримувати дуже невелику кількість волокон, що значно знижує експлуатаційні витрати. Для мережі 5G використання технології WDM-PON є важливою. Отже, проєкт є життєздатним та має можливість розвитку, оскільки він є економічно вигідним з усіх основних техніко-економічних показників.

Основною вимогою до програмного забезпечення є його точність в здійсненні обробки інформації. Якщо програмне забезпечення було заражене вірусним програмним забезпеченням, воно може вийти з ладу або виконувати свої функції з помилками. У випадку надзвичайної ситуації необхідно вжити заходів для очищення жорсткого диску від вірусного програмного забезпечення. Щоб запобігти подібним надзвичайним ситуаціям, слід застосовувати антивірусні програми та мережеві екрани.

## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було проаналізовано вплив різних явищ на передачу світлового сигналу в оптоволоконних середовищах. Після дослідження методів мультиплексування та частотного розділення сигналів можна зробити наступні висновки.

По-перше, важливо зазначити, що оптичні мережі зазвичай використовують оптичні кабелі з багатомодовими та одномодовими волокнами. Багатомодові волокна дозволяють передавати більше одного сигналу в мережі, проте вони мають меншу пропускну здатність та викликають більше спотворень в сигналах. На відміну від цього, одномодові волокна мають більшу пропускну здатність та менше спотворень, проте вони можуть передавати лише один сигнал за раз. Тому для більш ефективного використання оптичної мережі може бути застосований метод мультиплексування.

По-друге, варто враховувати, що одним із важливих аспектів методу мультиплексування є його здатність до ефективного використання частотного спектру. Частотне розділення сигналів (FDM) та модовий мультиплексування (MDM) - це методи, які використовують частотне розділення, а ущільнення за поляризацією - це метод, що використовує різницю в поляризації сигналів. Однак, як ви зазначили в своїй роботі, ці методи мають обмеження, пов'язані з неоднорідностями в структурі волоконно-оптичного кабелю, тому більш ефективними методами мультиплексування є системи WDM та PON.

Наприклад, система WDM використовує різні довжини хвиль для передачі даних по різних каналах, тоді як система PON використовує часову доменну мультиплексацію. Важливо зазначити, що кожен метод мультиплексування має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного методу залежить від потреб користувачів та характеристик мережі.

По-третє, розглянута у дипломній роботі альтернативна система мультиплексування сигналу, яка працює за принципом WDM та TDM з використанням принципу паралелізму. Цей метод мультиплексування дозволяє

збільшити максимальну швидкість передачі інформації групового потоку, а також збільшити пропускну здатність групового каналу за потребою шляхом встановлення додаткового апаратного обладнання (передавачів/приймачів).

Окрім того, в дипломній роботі було виявлено, що вдосконалення технології виготовлення оптоволоконних кабелів є необхідним для покращення якості передачі інформації на фізичному рівні. Також було зазначено, що недоліками методів модового мультиплексування та ущільнення за поляризацією є їхнє обмеження неоднорідностями в структурі волоконно-оптичного кабелю.

Також важливим фактором є вибір відповідної технології мультиплексування залежно від потреб мережі. Наприклад, система PON є більш ефективною для організації передачі інформації на великі відстані, зокрема у мережах доступу, тоді як система WDM є більш ефективною для передачі інформації на короткі відстані, зокрема у магістральних мережах.

Слід зазначити, що в даний час розробляються нові технології мультиплексування, такі як квантовий мультиплексування, які можуть мати значний вплив на майбутній розвиток оптоволоконних мереж.

У підсумку, вивчення технологій мультиплексування в оптичних кабелях дозволяє розуміти принцип їхньої роботи та переваги над іншими технологіями передачі інформації.

Дослідження показали, що методи мультиплексування можуть збільшувати пропускну здатність оптоволоконних мереж та забезпечувати більш ефективну передачу інформації.

Нові технології мультиплексування, такі як квантовий мультиплексування, можуть мати великий вплив на майбутній розвиток оптоволоконних мереж. Розроблена структурна схема альтернативної системи мультиплексування сигналу, яка працює за принципом WDM та TDM з використанням принципу паралелізму, може бути використана для організації оптичних мереж та для передачі інформації в магістральних лініях зв'язку, що дозволить багатократно збільшити максимальну швидкість передачі інформації.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Новак А. А., Нервал О. В., Трохим С. І. Методи та засоби мультиплексування в оптичних телекомунікаційних системах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2012. № 735. С. 130-136.
2. Бабиченко М. В., Івахненко О. М. Світлові хвилі в оптичних мережах доступу. *Науковий вісник Інформаційно-аналітичного центру «Техніка та технології телекомунікацій»*. 2015. № 4. С. 105-110.
3. Білінський І. І., Кіт І. І., Крупченко В. С., Іващенко І. В. Оптичні мережі на основі розподілених систем доступу. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету*. 2016. Вип. 28. С. 49-53.
4. Бойко Р. В., Дуб Ю. В. Методи мультиплексування в оптичних мережах з технологією PON. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету*. 2018. № 35. С. 40-49.
5. Бойчук Ю. О., Жовтобрюх І. О., Клименко В. О. Дослідження методу мультиплексування WDM в оптичних мережах PON. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2012. Вип. 51. С. 53-59.
6. Величко В. М., Клименко А. С., Осадчий Ю. І. Визначення параметрів оптичних мультиплексорів в мережах PON. *Технічні науки та технології : наук.-техн. зб.* Київ. 2017. № 3 (92). С. 121-126.
7. Величко В. М., Осадчий Ю. І., Клименко А. С. Моделювання мережі PON з використанням оптичних мультиплексорів з мікрохвильовою зондуючою хвилею. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2016. № 844. С. 45
8. Вістунов, В. Д., Гаттуров, В. К. Аналіз побудови мереж доступу на основі сучасних широкосмугових технологій. *Перспективи телекомунікацій : матеріали міжнар. наук.-техн. 78 конф., м. Київ, 12-16 квіт. 2021.* С. 38-40.
9. Головенський О.В. та ін. *Оптичні мережі доступу : навчальний посібник.* Київ: НАУ, 2015. 232 с.

10. Гусейнов, А. А., Бутенко, В. І., Малюга, О. О. Мультиплексування волоконно-оптичних мереж з різними методами доступу. *Збірник наукових праць ДонНТУ*. 2015. № 1. С. 26-33.

11. Дерев'янка О.П. та ін. *Оптичні мережі доступу* : навчальний посібник. Київ: Центр учбової літератури, 2017. 272 с.

12. Дрозд О. О., Лінів В. І., Нікіфорова Л. В. Аналіз впливу параметрів мережі PON на ефективність передачі інформації. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету*. 2015. Вип. 24. С. 113-119.

13. Дроздов, Є. М., Крутько, П. О. Методи мультиплексування в оптичних мережах з магістральним доступом. *Електронне наукове фахове видання «Технічна електродинаміка»*. 2013. № 1. С. 16-23.

14. Дятлов В. О. Оптичні мережі доступу з технологією мультиплексування. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців* : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, м. Кіровоград. 2018. С. 98-100.

15. Євтушенко Є. В., Петровський О. І., Шляхов Ю. А. Аналіз методів мультиплексування у системах оптичного доступу. *Електронне наукове видання «Телекомунікаційні та радіотехнічні системи»*. 2018. № 19. С. 37-43.

16. І. С. Дідковський, В. О. Кузнецов, А. А. Машенко. Дослідження характеристик оптичних мультиплексорів на основі дифракційних ґраток. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2014. Т. 2, № 72. С. 95-99.

17. Іванів Р. В., Дідик Ю. М. Оптимізація параметрів мультиплексного керування каналами у волоконно-оптичних мережах. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2019. № 2 (30). С. 83-87.

18. Карташов С. О., Нікіфорова Л. В. Порівняльний аналіз методів мультиплексування в оптичних мережах. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 1(21). С. 33-39.

19. Кіт І. І., Крупченко В. С., Кривенко А. О., Ільїн О. О. Оптична мережа з кількома хмарами: аналіз енергетичної ефективності. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету*. 2018. Вип. 35. С. 80-87.

20. Кіт І. І., Семенюта А. А. Аналіз параметрів мультиплексування в оптичних мережах PON. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. № 1(267). С. 50-54.

21. Клименко, О. С., Петров, Ю. В. Дослідження технологій PON та WDM-PON. *Наукові праці ДонНТУ*. 2015. № 2. С. 32-39.

22. Коваль О. В. Мультиплексування в оптичних мережах передачі інформації. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців* : матеріали II всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, м. Кіровоград. 2017. С. 149-151.

23. Коваль О. В. Мультиплексування в оптичних кабелях. *Електронне наукове видання «Електроніка та телекомунікації»*. 2018. Т. 23, № 4. С. 44-49.

24. Коломієць О. О., Коханович І. В., Єсіков М. В. Аналіз різних технологій WDM у мережах доступу на основі PON. *Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини*. 2015. Вип. 2 (138). С. 23-27.

25. Коротченко Ю. В., Липай О. Ю. Підвищення ефективності каналів доступу в мережах PON з використанням методів мультиплексування. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2014. Вип. 63. С. 32-38.

26. Криштоп І. В., Штанько Р. Я., Євстратенко В. В. та ін. Дослідження шляхів збільшення ємності каналів PON з використанням методів WDM. *Збірник наукових праць Національного університету «Львівська політехніка»*. 2017. № 870. С. 90-96.

27. Кулішенко Ю.В., Жук С.М., Дубовий М.М. Дослідження залежностей рівня Q-фактору від параметрів системи PON. *Науковий вісник Миколаївського національного університету імені В.О. Сухомлинського*. 2017. № 2. С. 49-54.

28. Леу Ю. І., Євтушенко А. В., Горбунова Ю. І. Технології WDM-PON. *Збірник наукових праць НТУ «ХПІ»*. 2008. № 26. С. 85-90.

29. Литвин, І. В. Оптичні мережі доступу: технології та перспективи розвитку. *Електронне наукове фахове видання «Телекомунікації та радіотехніка»*. 2015. № 2. С. 68-76.

30. Лупій І. В., Сисоєва С. І. Аналіз методів мультиплексування в оптичних мережах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2018. № 914. С. 34-41.

31. Макаренко О. О. Мультиплексування в оптичних мережах з довільною топологією. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету*. 2017. № 28. С. 170-175.

32. Міщанін В. І., Яковенко М. С., Карташов В. І. Моделювання мережі PON з диференційованим доступом і мультиплексуванням по довжині хвилі. *Науково-технічний журнал «Електронні прилади»*. 2016. № 5. С. 45-51.

33. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Котенко М. О., Омецінська О. Б. Оптичні мережі доступу (xPON) під редакцією Катка В. Б. Київ. 2006. 65 с.

34. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омецінська О. Б. WDM під редакцією Катка В. Б. Київ. 2005. 194с.

35. Перевірко В. О., Биков О. М. Оптимізація мультиплексування для забезпечення якості обслуговування у PON. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету*. 2017. № 3. С. 54-59.

36. Передерій І. В., Кушнір В. І. Аналіз методів мультиплексування в WDM-мережах з різними діапазонами. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2012. Вип. 50. С. 59-66.

37. Петров М.В., Литвиненко С.В., Верведа А.М. Аналіз ефективності оптичних мереж доступу з мультиплексуванням типу WDM PON. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології* : матеріали 11-ї міжн. наук.-техн. конф, м. Київ: ІПЕНД ім. Є.О. Патона НАН України. 2016. С. 200-203.

38. Петров, Ю. В., Кузнецов, О. О. Аналіз технології WDM-PON. *Наукові праці ДонНТУ*. 2012. № 2. С. 102-108.

39. Попов І. Ю., Тур І. О. Оптичні мережі доступу PON. *ВПЦ «Київський університет»*. Київ. 2008. 234 с.
40. Попович В. М., Шкарбан О. В., Домбровський С. В. Аналіз методів мультиплексування у фізичному рівні оптичних мереж. *Збірник наукових праць НУ «Львівська політехніка»*. 2016. № 847. С. 123-129.
41. Рибалка В.С., Рожнев В.В., Євтушенко В.М. Моделювання оптичних мереж доступу з керованим доступом і мультиплексуванням в частотному діапазоні. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2017. № 70. С. 60-65.
42. Рудь М. Б. Особливості застосування технології WDM-PON в оптичних мережах доступу. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2019. Вип. 77. С. 5-12.
43. Сінельников, М. В. Технології PON і WDM-PON в сучасних оптичних мережах зв'язку. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2013. № 757. С. 166-171.
44. Смірнов Ю. В., Іванов В. С., Ємець В. В. Методи мультиплексування в оптичних мережах з використанням волоконно-оптичних ліній зв'язку. *Електронне наукове фахове видання «Інформаційні технології в освіті»*. 2018. № 35 (16). С. 134-141.
45. Стецюк, О. І. Технологія PON – перспективна технологія передачі даних в оптичних мережах зв'язку. *Науковий вісник Ужгородського університету*. 2015. № 38. С. 19-25.
46. Ханін, Є. О. Дослідження технологій мультиплексування в оптичних мережах PON. *Молодий вчений*. 2017. № 2 (1). С. 218-221.
47. Хаустова, А. А., Герасименко, Ю. В. Дослідження ефективності технологій PON. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету*. 2014. № 27. С. 163-168.
48. Хомчак І. І., Ващенко С. Ю. Дослідження ефективності методів мультиплексування в мережах з доступом на основі технології PON. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету*. 2018. № 35. С. 29-37

49. Antony, et al. Bandwidth allocation for WDM-PON based on dynamic priority assignment scheme. *Journal of Optical Communications*. 2013. Vol. 34, No. 1. P. 13-21.
50. Banerjee, Amitabha & Park, Youngil & Clarke, Frederick & Song, Huan & Yang, Sunhee & Kramer, Glen & Kim, Kwangjoon & Mukherjee, Biswanath. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access. *Journal of Optical Networking*. 2005. Vol. 4. P. 737-758. Doi: 10.1364/JON.4.000737.
51. Chan K., et al. Field-trial demonstration of WDM PON for converged broadband services. *Journal of Lightwave Technology*. 2009. Vol. 27, No. 3. P. 237-243.
52. Chanclou P., et al. WDM-PON enabling technologies for future access networks. *Journal of Optical Communications*. 2008. Vol. 29, No. 4. P. 179-192.
53. Chowdhury A., et al. Coherent WDM-PON using low-cost lasers. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2014. Vol. 6, No. 7. P. 634-642.
54. Chung Y. C., et al. WDM-PON technologies for broadband access: a review. *Journal of Optical Networking*. 2007. Vol. 6, No. 7. P. 661-683.
55. Crisp M. J., et al. A 100 Gb/s WDM-PON using a single coherent transmitter and a low cost burst-mode receiver. *Journal of Lightwave Technology*. 2015. Vol. 33, No. 4. P. 698-703.
56. Czékus J., Megyesi P., Mitcsenkov A., Mazroa D. *Hardware cost and capacity analysis of future TDM- and WDM-PON access networks* : 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Austria. 2014. P. 1-4. doi: 10.1109/ICTON.2014.6876474.
57. Davey R., et al. Next-Generation PON: NG-PON2. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2014. Vol. 6, No. 5. P. 477-487.
58. Dixit S. WDM Passive Optical Network and Its Enabling Technologies: A Survey. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2012. Vol. 4, No. 5. P. 358-366.

59. Dixit S., et al. Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network (WDM-PON): Current Status and Future Directions. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2010. Vol. 2, No. 10. P. 1-15.
60. Figueiredo M. A. T., et al. Optical networking and the future Internet: A survey on research challenges and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17, No. 4. P. 2245-2278.
61. Gill S. S. Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Networks. *Proceedings of SPIE*. 2007. Vol. 6825. P. 831-839.
62. Hammad, et al. Optical CDMA for fiber-optic access networks. *Journal of Lightwave Technology*. 2006. Vol. 24, No. 12. P. 4628-4645.
63. Hiltunen V., et al. Dynamic wavelength assignment in WDM-PON with tunable lasers. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2009. Vol. 1, No. 4. P. 320-328.
64. Jafari M., et al. Enhanced Protection Schemes for WDM-PON in the Case of Disasters and Catastrophes. *Journal of Lightwave Technology*. 2014. Vol. 32, No. 4. P. 766-776.
65. Jain S., et al. A survey on bandwidth management in passive optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2013. Vol. 5, No. 11. P. 1224-1239.
66. Kang S. G., et al. Wavelength-tunable ONU based on a cyclic arrayed-waveguide grating for wavelength division multiplexing-passive optical networks. *Journal of Lightwave Technology*. 2010. Vol. 28, No. 17. P. 2491-2501.
67. Kazovsky L., Cheng N. Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research Towards Unlimited Bandwidth Access. *Journal of Lightwave Technology*. 2009. Vol. 27, No. 3. P. 188-202.
68. Lee K., et al. Joint scheduling of traffic and wavelength in WDM-PON with tunable lasers. *Journal of Lightwave Technology*. 2013. Vol. 31, No. 3. P. 462-471.
69. Lee S., et al. WDM-PON-based Gigabit Ethernet Passive Optical Network (GEPON). *Journal of Optical Networking*. 2007. Vol. 6, No. 5. P. 565-577.

70. Liu X., et al. Next-Generation WDM-PONs and WDM-TDM-PONs: Technical Challenges and Solutions. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2010. Vol. 2, No. 10. P. 848-861.

71. Lopes J. P., et al. A comparative study of WDM-PON and TDM-PON architectures for next-generation optical access networks. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2010. Vol. 2, No. 5. P. 272-281.

72. Maier G., Feldmann A., Paxson V., Allman M. *On dominant characteristics of residential broadband internet traffic* : 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement, Chicago, USA. 2009. P. 77.

73. Maier G., Martinelli M., Pattavina A., Salvadori E. Design and cost performance of the multistage WDM-PON access networks. *Journal of Lightwave Technology*. 2000. Vol. 18, No. 2. P. 125-143. Doi: 10.1109/50.822785.

74. Maier M., et al. Analysis of hybrid WDM/TDM PON architectures for next-generation optical access. *Journal of Optical Networking*. 2007. Vol. 6, No. 5. P. 552-562.

75. Medeiros R. C. A., et al. Protection and Restoration Mechanisms in WDM-PON Networks: A Comprehensive Review. *Journal of Lightwave Technology*. 2012. Vol. 30, No. 4. P. 522-537.

76. Megyesi P., Molnár S. Analysis of elephant users in broadband network traffic. *Advances in Communication Networking*. 2013. Vol. 8115. P. 37-45.

77. Mitchell J. E., et al. WDM-PONs: A viable solution for access networks. *IEEE Communications Magazine*. 2007. Vol. 45, No. 3. P. 52-58.

78. Roh H., et al. Chromatic dispersion mitigation using electrical equalization for WDM-PON. *Journal of Optical Networking*. 2007. Vol. 6, No. 6. P. 675-681.

79. Sun, X., Wang, X. PON and WDM-PON technology: a review. *Journal of Network and Computer Applications*. 2015. Vol. 50. P. 212-228.

80. Tsukamoto K., et al. Simultaneous delivery of broadcast analog TV and digital PON services using WDM-PON technology. *Journal of Lightwave Technology*. 2005. Vol. 23, No. 7. P. 2410-2417.

81. Von der Weid J. P. Passive optical networks. *Optical Fiber Technology*. 2005. Vol. 11, No. 4. P. 297-311.

82. Yi X., et al. WDM-PONs Based on OFDM Modulation and Direct Detection: A Review. *Journal of Lightwave Technology*. 2017. Vol. 35, No. 4. P. 809-821.

83. Zhang H., et al. 10 Gb/s single wavelength colorless WDM-PON using a 10 GHz self-seeding Fabry-Perot laser diode. *Optics Express*. 2011. Vol. 19, No. 26. P. B486-B491.

**ДОДАТОК А**  
(обов'язковий)

**КОПІЇ СТАТЕЙ У ЗАКОРДОННИХ НАУКОВИХ ВИДАННЯХ ТА  
ТЕЗ ДОПОВІДІ НА МІЖНАРОДНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ**

- 1) Y. Zverev, O. Ivanov. Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM. VII Міжнародна науково-практична конференція “SCIENTIFIC RESEARCH IN THE MODERN WORLD” , 2023.

**МЕТОД МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ В ОПТИЧНОМУ КАБЕЛІ В  
ТЕХНОЛОГІЯХ PON І WDM**

**Зверєв Є.Є**

студент II курсу магістратури

Науковий керівник:

**Іванов О.В.**

кандидат технічних наук, доцент

Хмельницький Національний Університет

м. Хмельницький, Україна

[is3kv3@ukr.net](mailto:is3kv3@ukr.net)

**Вступ.** Телекомунікації є однією з найбільш швидкозростаючих галузей нашого життя. Оптичні кабелі зв'язку мають значні переваги порівняно з мідними кабелями та радіозв'язком, такі як висока пропускна здатність, захищеність від зовнішніх електромагнітних полів, низькі втрати, малі габарити та маса, висока економічність. З метою ефективного використання ресурсів та максимального використання потенціалу оптоволоконних ліній передачі інформації, дослідження методів та технологій мультиплексування сигналу стає все більш актуальним.

**Мета роботи** полягає у вивченні особливостей середовища передачі даних по оптичних кабелях, а також різних методів та технологій, що використовуються для мультиплексування та розділення сигналів за частотою.

Досліджування виконувалося на **матеріалах** праць таких наукових дослідників, як: А. А. Новак, О. В. Нервал, С. І. Трохим, Бойчук Ю. О., Жовтобрюх І. О., Клименко В. О. **Методи** дослідження: методи цифрового кодування, метод сигналізаційного моніторингу.

**Результати й обговорення.** Зростання кількості підключених до мережі пристроїв та потреба у високошвидкісному доступі до Інтернету призвели до значного збільшення обсягу передачі даних по оптичних мережах. Оптичний кабель став важливою складовою сучасної інфраструктури цифрового світу. Для забезпечення високошвидкісного доступу до Інтернету та передачі даних на великі відстані у телекомунікаційних мережах застосовуються різні технології. Однією з таких технологій є PON, яка дозволяє передавати великий обсяг даних на великі відстані без збільшення кількості оптичних волокон. Іншою технологією є WDM, яка дозволяє передавати сигнали на різних довжинах хвиль, що збільшує пропускну здатність кабелю та кількість передаваних каналів.

Однак, використання цих технологій також викликає ряд проблем. Наприклад, PON технології мають обмежену кількість каналів та обсяг передаваних даних на кожен з них. Також, в PON технологіях є проблема зі зниженням швидкості передачі даних при збільшенні відстані між вузлами мережі. У WDM технологіях проблемою може бути вибір правильної довжини хвилі, що забезпечить максимальну пропускну здатність кабелю.

Отже, постановка проблеми полягає в тому, щоб визначити основні проблеми, пов'язані з використанням методу мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM.

Оптичні мережі, що використовують методи PON і WDM, дозволяють передавати великі обсяги даних на великі відстані з високою швидкістю передачі. Проте, при використанні цих технологій виникають проблеми з відсутністю додаткових резервних каналів та складності в обслуговуванні.

Одна з основних проблем пов'язаних з методом мультиплексування в оптичному кабелі - це проблема кроссрозетки (англ. crosstalk). Кроссрозетка виникає при змішуванні сигналів, що передаються по різних каналах, що може

привести до зниження якості сигналу та збоїв у передачі даних. Для розв'язання цієї проблеми необхідно використовувати високоякісні елементи та спеціальні технології, що збільшує вартість виробництва та ускладнює процес обслуговування мережі.

Іншою проблемою є обмеження пропускної здатності мережі, особливо при використанні методу мультиплексування в оптичному кабелі на великих відстанях. Це може стати перешкодою для розвитку мережі та погіршення якості обслуговування користувачів.

Крім того, відсутність додаткових резервних каналів у оптичних мережах може призвести до перерв у передачі даних при виникненні збоїв. Для запобігання таких ситуацій необхідно розробляти та використовувати механізми відновлення з'єднання та відновлення даних.

Отже, використання методу мультиплексування в оптичній мережі забезпечує збільшення її пропускної здатності, а також зниження витрат на будівництво та експлуатацію. Однак, існує декілька основних проблем, пов'язаних з використанням методу мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM, які потребують детальнішого вивчення.

Після порівняння різних методів, встановлено, що для пасивних оптичних мереж, які задовольняють поточним потребам, найкращими є GPON та EPON (10G EPON)[1].

Слід також зазначити, що у GPON є низка переваг порівнюючи з EPON:

- Вища пропускна здатність (2,4 Гбіт/с);
- Має можливість передавати аналоговий сигнал;
- Максимальна кількість абонентських вузлів сягає близько 128, що переважає навіть технологію 10G EPON.

Технологія GEPON має ряд переваг:

- передбачує використання витої пари, що суттєво знижує затрати при встановленні [2,3];
- забезпечує найвищу пропускну здатність серед PON(пасивних оптичних мереж) (10G EPON);

Загальні переваги пасивних оптичних мереж:

- низька вартість обладнання;
- процес налаштування, встановлення мережі та підключення нових вузлів є досить тривіальним та простим.;
- реалізація передачі висхідного та низхідного потоків по одному волокну одночасно;
- мережа складається з малої кількості компонентів.

Отже, технологія PON чудово підходить для розгортання комп'ютерних мереж в межах населеного пункту [4,6]. Але головною проблемою цієї системи є те, що абонентський вузол (ONU/ONT), отримуючи дані, може також отримувати дані інших вузлів, які підключені до того ж спліттера. Хоча система абонентського вузла аналізує пакетні дані, щоб передавати користувачу тільки його власні дані і ігнорувати інші, проте з відповідними навичками можна отримати доступ до інформації інших користувачів [5,7].

Таким чином можна визначити ряд наступних переваг WDM систем:

- висока швидкість передачі інформації (до 10 Гбіт/с , а іноді до 40 Гбіт/с);
- велика кількість каналів передачі даних (до 160);
- передача інформації на великі відстані (до 160 км) [8,9].

Недоліки WDM систем:

- зазвичай, канал виділено під одного абонента;
- висока вартість обладнання;
- система вимагає постійного контролю та регулярного обслуговування.

Відповідно, використання WDM систем значно ефективніше для реалізації магістральних ліній передачі інформації [10,13].

Після вивчення наявних методів мультиплексування і розділення частот сигналів у волоконно-оптичних кабелях, було розроблено новий метод мультиплексування сигналу [11,12], який базується на хвильовому ущільненні сигналу (WDM) [14] та часовому мультиплексуванні (TDM). Основна перевага цього методу полягає у тому, що він не вимагає заміни обладнання системи передачі інформації і може використовувати вже існуючі лінії зв'язку. Кожна

несуча хвиля у WDM системі є окремим каналом передачі інформації, що може знизити продуктивність в періоди, коли канал не передає жодної інформації, тоді як у TDM мультиплексуванні кожен пакет передається в заданий період часу. У новому методі всі хвилі використовуються як один канал передачі даних з використанням TDM. Це означає, що пакетні дані користувача будуть розділені на рівні частини між каналами та передаватимуться одночасно. В результаті, цей метод зможе значно збільшити максимальну пропускну здатність однієї лінії передачі інформації.

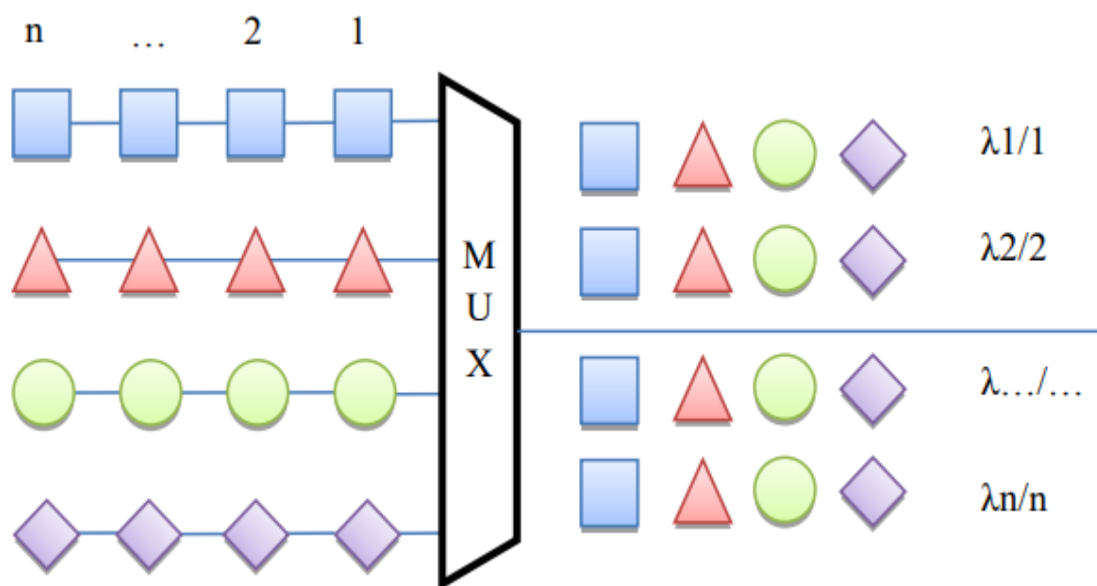


Рис.1. Альтернативний метод мультиплексування в технологіях WDM і PON

**Висновки.** Для поліпшення якості оптичного каналу передачі інформації на фізичному рівні потрібне вдосконалення технології виготовлення оптоволоконних кабелів.

Збільшення пропускну здатності оптоволоконних ліній передачі інформації можна досягти за допомогою технологій мультиплексування, що можуть бути використані на вже наявних лініях зв'язку.

Методи модового мультиплексування та ущільнення за поляризацією мають недоліки, пов'язані з неоднорідностями у структурі волоконно-оптичних кабелів.

Найкращі характеристики серед існуючих методів мультиплексування мають системи WDM та PON.

На основі аналізу була розроблена структурна схема альтернативної системи мультиплексування сигналу, яка працює за принципом WDM та TDM, але з використанням принципу паралелізму, що дозволить багатократно збільшити максимальну швидкість передачі інформації групового потоку.

Система дозволяє збільшувати пропускну здатність групового каналу за потребою, встановленням додаткового апаратного обладнання, таких як передавачі та приймачі.

### Список використаних джерел

1. Новак А. А, Нервал О. В., Трохим С. І. Методи та засоби мультиплексування в оптичних телекомунікаційних системах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2012. № 735. С. 130-136.
2. Бойчук Ю. О., Жовтобрюх І. О., Клименко В. О. Дослідження методу мультиплексування WDM в оптичних мережах PON. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2012. Вип. 51. С. 53-59.
3. Вістунов, В. Д., Гаттуров, В. К. АНАЛІЗ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ДОСТУПУ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ ШИРОКОСМУГОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ. ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ : матеріали міжнар. наук.-техн. 78 конф., м. Київ, 12-16 квіт. 2021. С. 38-40.
4. Гусейнов, А. А., Бутенко, В. І., Малюга, О. О. Мультиплексування волоконно-оптичних мереж з різними методами доступу. *Збірник наукових праць ДонНТУ*. 2015. № 1. С. 26-33.
5. Дроздов, Є. М., Крутько, П. О. Методи мультиплексування в оптичних мережах з магістральним доступом. *Електронне наукове фахове видання «Технічна електродинаміка»*. 2013. № 1. С. 16-23.
6. Дятлов В. О. Оптичні мережі доступу з технологією мультиплексування. Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, м. Кіровоград. 2018. С. 98-100.

7 І. С. Дідковський, В. О. Кузнєцов, А. А. Мащенко. Дослідження характеристик оптичних мультиплексорів на основі дифракційних ґраток. Вісник Житомирського державного технологічного університету. 2014. Т. 2, № 72. С. 95-99.

8 Іванів Р. В., Дідик Ю. М. Оптимізація параметрів мультиплексного керування каналами у волоконно-оптичних мережах. Наукові праці Донецького національного технічного університету. 2019. № 2 (30). С. 83-87.

9. Клименко, О. С., Петров, Ю. В. Дослідження технологій PON та WDM-PON. Наукові праці ДонНТУ. 2015. № 2. С. 32-39.

10. Коваль О. В. Мультиплексування в оптичних мережах передачі інформації. Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців : матеріали II всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю, м. Кіровоград. 2017. С. 149-151.

11. Коваль О. В. Мультиплексування в оптичних кабелях. Електронне наукове видання «Електроніка та телекомунікації». 2018. Т. 23, № 4. С. 44-49.12. Інформаційна безпека систем Інтернету речей: проблеми та можливості [Текст] / О. Дмитренко, О. Горбатенко, І. Кузнєцова та ін.; за ред. О. Дмитренка. - Київ : КНУТД, 2017. - 188 с.

12. Леу Ю. І., Євтушенко А. В., Горбунова Ю. І. Технології WDM-PON. Збірник наукових праць НТУ «ХП». 2008. № 26. С. 85-90.

13. Литвин, І. В. Оптичні мережі доступу: технології та перспективи розвитку. Електронне наукове фахове видання «Телекомунікації та радіотехніка». 2015. № 2. С. 68-76.

14. Лупій І. В., Сисоєва С. І. Аналіз методів мультиплексування в оптичних мережах. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2018. № 914. С. 34-41.

# CERTIFICATE

is awarded to

**Zvieriev Yevhen**

for being an active participant in  
VII International Scientific and Practical Conference

## “SCIENTIFIC RESEARCH IN THE MODERN WORLD”

24 Hours of Participation  
(0,8 ECTS credits)

**TORONTO**

4-6 May 2023



[sci-conf.com.ua](http://sci-conf.com.ua)



**ДОДАТОК Б**  
**(обов'язковий)**

**ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM**

Студент Зверев Євген  
Керівник кандидат техн. наук, доцент Іванов О.В.

- *Метою кваліфікаційної роботи є аналіз методів та технологій мультиплексування та частотного розділення сигналів та розробка альтернативного методу мультиплексування в технологіях PON I WDM*
- *Об'єктом дослідження є процес передачі інформації через оптоволоконний кабель у волоконно-оптичних системах передачі.*
- *Предметом дослідження є мультиплексування сигналу у волоконно-оптичному середовищі, особливості частотного розділення сигналу.*

## Наукова новизна отриманих результатів

- Вперше було запропоновано використання принципу паралелізму в системах передачі інформації через оптичні волокна, що полягає у використанні кількох каналів передачі як одного.
- Вперше було досягнуто максимально ефективного використання групового каналу передачі інформації, завдяки використанню динамічних вікон часу для користувачів.

## Практична значущість отриманих результатів

- полягає у розробленні методу мультиплексування, який може бути застосований для магістральних ліній зв'язку, в рази збільшуючи пропускну здатність групового потоку в мережах.

## Актуальність дослідження

- Телекомунікації є однією з найбільш швидко розвиваючих галузей нашого життя. Системи передачі інформації на сьогодні стали невід'ємною частиною як бізнесу та економіки, так і побутового рівня. Основні вимоги до таких систем полягають у високій швидкості та надійності передачі інформації. Засновані на використанні оптичних волоконних світловодів, оптичні лінії зв'язку є важливою складовою сучасних телекомунікаційних систем.

## Актуальність дослідження (2)

- Оптичні кабелі зв'язку мають значні переваги порівняно з мідними кабелями та радіозв'язком, такі як висока пропускна здатність, захищеність від зовнішніх електромагнітних полів, низькі втрати, малі габарити та маса, висока економічність. З метою ефективного використання ресурсів та максимального використання потенціалу оптоволоконних ліній передачі інформації, дослідження методів та технологій мультиплексування сигналу стає все більш актуальним.

## Постановка задачі

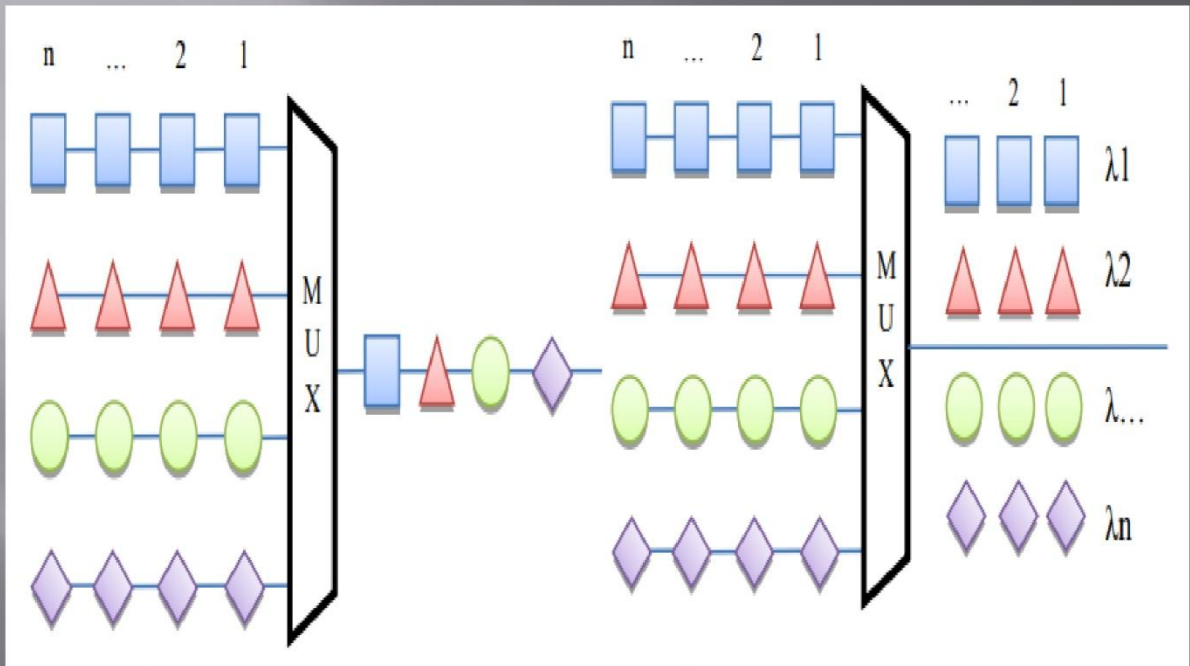
Для розроблення альтернативного методу мультиплексування необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати особливості та параметри методів мультиплексування та частотного розділення сигналів в оптоволоконних кабелях
- оцінити методи та технології мультиплексування та частотного розділення сигналів і провести порівняння існуючих систем мультиплексування, виокремивши їх переваги та недоліки

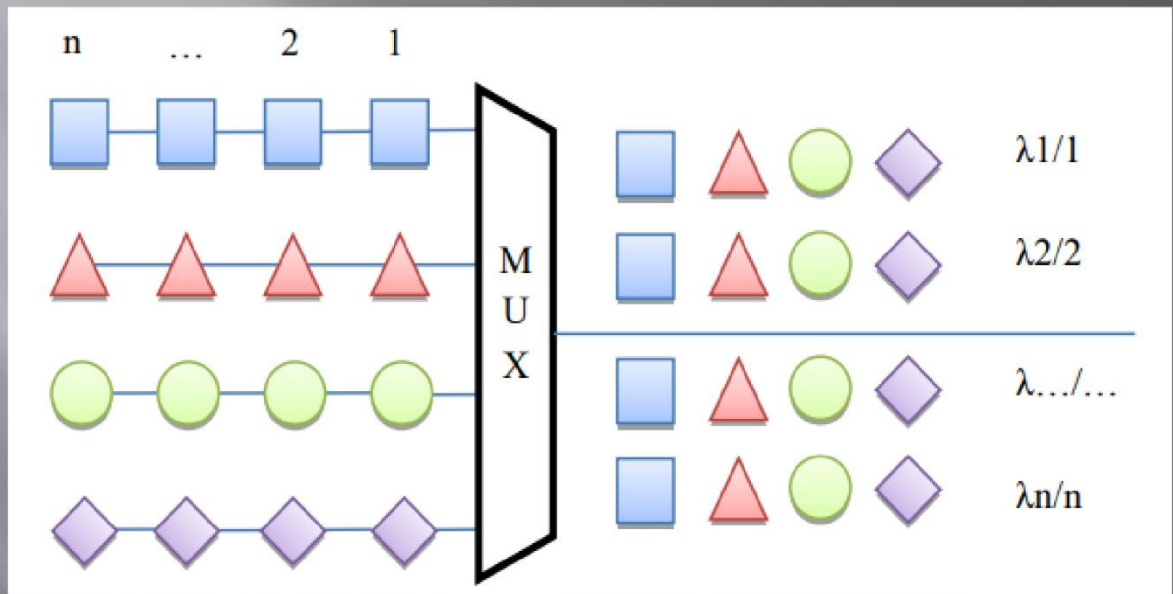
## Постановка задачі (2)

- проаналізувати явища, які мають вплив на передачу даних
- розробити структурну схему альтернативного методу мультиплексування та частотного розділення сигналу в оптичному кабелі

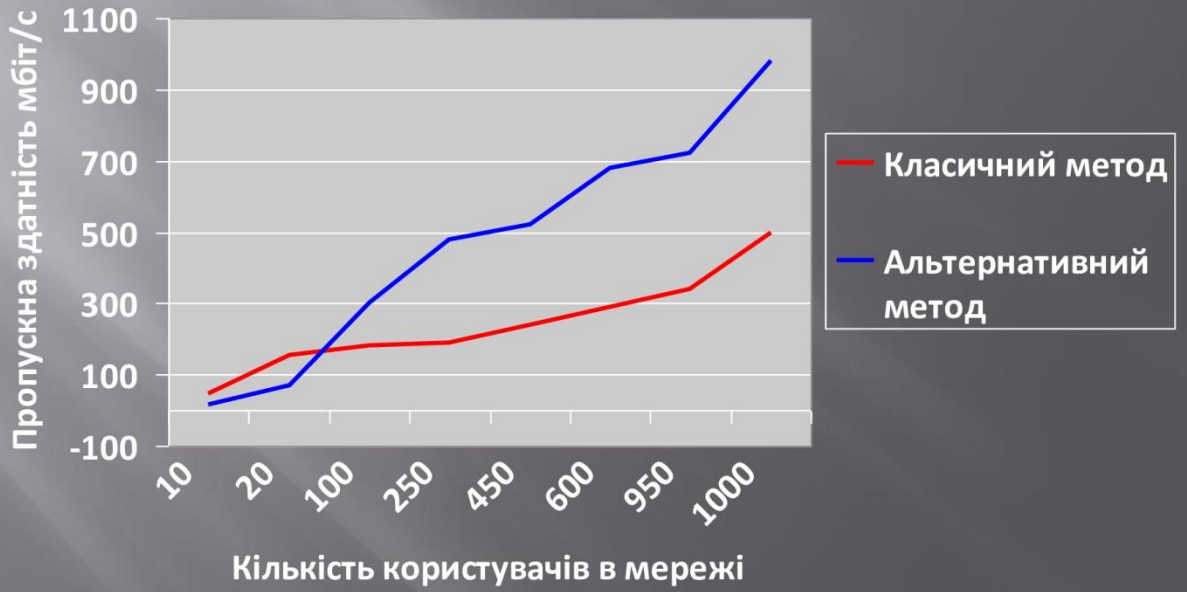
# Метод мультиплексування в TDM і WDM



## Альтернативний метод мультиплексування



## Порівняння альтернативного методу з вже готовими рішеннями



## Висновки

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень підвищено пропускну здатність за допомогою альтернативного методу:

- У першому розділі досліджувалося питання передачі світлового сигналу в оптоволоконних кабелях. Розглянуто фізичні властивості світла та середовища передачі, а також хімічний склад та механічні особливості кабелю, які впливають на ефективність передачі. Також проаналізовано використання технологій мультиплексування для збільшення пропускну здатності та порівняно їх ефективність. Досліджено альтернативну технологію передачі даних - металеві волокна, їх переваги та недоліки порівняно з оптичними волокнами. Узагальнено, що оптичні волокна залишаються більш популярним та ефективним варіантом для передачі великих обсягів даних на великі відстані.

## Висновки (2)

- В другому розділі було описано основні системи мультиплексування сигналу в оптоволоконному кабелі, такі як WDM та PON. Також було описано обмеження, які виникають при використанні WDM систем через обмежену потужність сигналу в оптоволоконному кабелі, що вимагає використання оптичних підсилювачів сигналу. Було наведено приклади використання пасивних оптичних мереж та технологій мультиплексування, таких як WDM, TDM та переформатування кадрів. Описано також технологію ATDM, яка використовується при передачі інформації від ONU до OLT.

## Висновки (3)

- В третьому розділі розглядалась технологія мультиплексування в оптичних мережах. Було наведено приклади поширених технологій, таких як GPON, EPON та 10GEPON, які використовуються в пасивних оптичних мережах. Було зазначено, що ці технології мають певний недолік, а саме незахищеність інформації. Далі було запропоновано альтернативний метод мультиплексування, який працює на основі WDM та TDM, але зі значними змінами. У цій системі всі канали, що розділені за довжиною хвилі, працюють як один. Ця технологія мультиплексування може бути застосована як для створення оптичних мереж, так і для передачі інформації в магістральних лініях зв'язку.

## Висновки(4)

- У четвертому розділі було проаналізовано технологію мережі доступу PON і виявлено, що у довгостроковій перспективі її майбутнє полягає в застосуванні технології WDM, яка використовує хвильову сітку DWDM для передачі великої кількості паралельних високошвидкісних каналів на одній PON-структурі. Також відзначено, що використання технології WDM-PON є важливим для мережі 5G. Крім того, було зазначено, що точність програмного забезпечення є важливою в здійсненні обробки інформації, а для запобігання надзвичайних ситуацій необхідно застосовувати антивірусні програми та мережеві екрани. Висновок підкреслює, що проєкт має можливість розвитку та є економічно вигідним з усіх основних техніко-економічних показників.

Ім'я користувача:  
Кафедра КІ

ID перевірки:  
1014980760

Дата перевірки:  
08.05.2023 21:01:54 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
08.05.2023 21:02:28 EEST

ID користувача:  
100005591

Назва документа: Зверев\_Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM

Кількість сторінок: 97 Кількість слів: 18281 Кількість символів: 139832 Розмір файлу: 1.74 MB ID файлу: 1014672488

## 18.8% Схожість

Найбільша схожість: 13.4% з Інтернет-джерелом (<http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/2711>)

18.4% Джерела з Інтернету 135 ..... Сторінка 99

0.66% Джерела з Бібліотеки 81 ..... Сторінка 100

## 0.24% Цитат

Цитати 1 ..... Сторінка 101

Посилання 1 ..... Сторінка 101

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 23

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилки в документах: 9%**

ID: 113105 Назва: МКР Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM Додано в БД: 2023-05-08 Автора: Зверев Є.Є. Керівники: Іванов О.В. Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	115993	908	2786 (2%)	32 (4%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Зверев Євген Євгенійович

Тема: Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 78с.

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є аналіз методів та технологій мультиплексування та частотного розділення сигналів.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі досліджувалося питання передачі світлового сигналу в оптоволоконних кабелях. Розглянуто фізичні властивості світла та середовища передачі, а також хімічний склад та механічні особливості кабелю, які впливають на ефективність передачі. Також проаналізовано використання технологій мультиплексування для збільшення пропускної здатності та порівняно їх ефективність. Досліджено альтернативну технологію передачі даних - металеві волокна, їх переваги та недоліки порівняно з оптичними волокнами. Узагальнено, що оптичні волокна залишаються більш популярним та ефективним варіантом для передачі великих обсягів даних на великі відстані. В другому розділі було описано основні системи мультиплексування сигналу в оптоволоконному кабелі, такі як WDM та PON. Також було описано обмеження, які виникають при використанні WDM систем через обмежену потужність сигналу в оптоволоконному кабелі, що вимагає використання оптичних підсилювачів сигналу. Було наведено приклади використання пасивних оптичних мереж та технологій мультиплексування, таких як WDM, TDM та

перереформування кадрів. Описано також технологію ATDM, яка використовується при передачі інформації від ONU до OLT. В третьому розділі розглядалась технологія мультиплексування в оптичних мережах. Було зазначено, що ці технології мають певний недолік, а саме незахищеність інформації. Далі було запропоновано альтернативний метод мультиплексування, який працює на основі WDM та TDM, але зі значними змінами. У цій системі всі канали, що розділені за довжиною хвилі, працюють як один. У четвертому розділі було проаналізовано технологію мережі доступу PON і виявлено, що у довгостроковій перспективі її майбутнє полягає в застосуванні технології WDM, яка використовує хвильову сітку DWDM для передачі великої кількості паралельних високошвидкісних каналів на одній PON-структурі. Крім того, було зазначено, що точність програмного забезпечення є важливою в здійсненні обробки інформації, а для запобігання надзвичайних ситуацій необхідно застосовувати антивірусні програми та мережеві екрани. Висновок підкреслює, що проєкт має можливість розвитку та є економічно вигідним з усіх основних техніко-економічних показників.

4. Позитивні сторони роботи: отримання двох пунктів наукової новизни
5. Негативні сторони роботи: Запропонований метод мультиплексування збільшує пропускну здатність коли кількість абонентів більше, ніж 20
6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи:  
Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації
7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на високому науково-технічному рівні
8. Інші зауваження:
9. Оцінка кваліфікаційної роботи: задовільно

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_  
Мартинюк В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки \_\_\_\_\_

« 11 » 05 2023р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри КПС  
д-р.техн.наук, проф. Говорущенко Т. О.

Зверева Євгена Євгенійовича  
ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-21-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

27 квітня 2023

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ**  
**КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**  
**ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод мультиплексування в оптичному кабелі в технологіях PON і WDM

Автор: Зверев Євген Євгенійович

Спеціальність: 123 – Компютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Іванов О.В., к.т.н., доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

**Підтвердження:**

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих методів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає 18.8% і адресується до 135 першоджерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи \_\_\_\_\_

Гарант ОП \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри КІС \_\_\_\_\_

О.В. Іванов

О. С. Савенко

Т. О. Говорущенко