

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи TSM-23м
спеціальності 172 – Електронні комунікації
та радіотехніка

Зонік К. А.

Керівник: к.т.н., професор каф. ІКСТ
Барась С. Т.

« 16 » 12 2024 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Семенов А.О.

« 16 » 12 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 16 » 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17– Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“24” 09 2024 року

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Зоніку Костянтину Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі

керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “17” 09 2024 року № 310

2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року

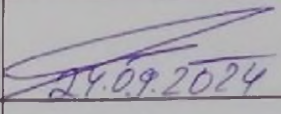
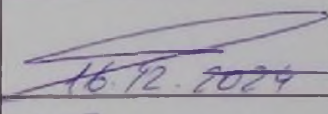
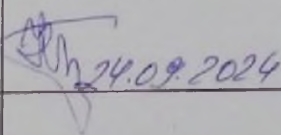
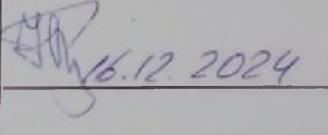
3. Вихідні дані до роботи: тип сигналів – оптичні, швидкість передачі даних – не менше 10 Гбіт/с у низхідному потоці, не менше 2,5 Гбіт/с – у висхідному потоці; довжина хвилі для передачі широкомовного сигналу (до ONU) – 1,55 мкм, у зворотному напрямку (від ONU) – 1,27 та 1,31 мкм; використання технології WDM, багатопозиційних видів модуляції, удосконалення архітектури мережі (топології), симетричний режим роботи.

4. Зміст текстової частини:

1. Особливості побудови пасивних оптичних мереж. 2. Аналіз технічних можливостей стандартів PON. 3. Вплив архітектури WDM-PON на якість широкосмугового доступу. 4. Розрахунки та комп'ютерне моделювання оптичної мережі. 5. Економічна частина.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Структура та основні елементи мережі PON. Технологія передачі низхідних та висхідних потоків у PON. Схеми включення сплітерів у мережі PON. Основні характеристики стандартів PON. Структура взаємодії мережі при використанні комбінованого оптичного модуля. Архітектура DWDM Super-PON. Результати комп'ютерного моделювання.

6. Консультанти розділів роботи

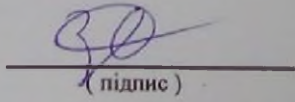
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	 24.09.2024	 16.12.2024
Економічна частина		 24.09.2024	 16.12.2024

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

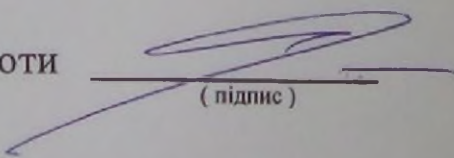
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	09.09.2024р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	16.09.2024р.	
3.	Огляд побудови пасивних оптичних мереж	12.10.2024р.	
4.	Аналіз стандартів PON та оцінка впливу архітектури мережі на якість широкосмугового доступу	30.10.2024р.	
5.	Розрахунки та комп'ютерне моделювання	11.11.2024р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	22.11.2024р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	02.12.2024р.	
8.	Нормоконтроль МКР	06.12.2024р.	
9.	Попередній захист МКР, опонування МКР	14.12.2024р.	
10.	Захист МКР ЕК	18.12.2024р.	

Студент


(підпис)

Зонік К. А.

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.3

Зонік К. А. Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2024. 107 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 22 назв; рис.:35; табл. 20.

Робота присвячена дослідженню широкосмугового доступу в пасивних оптичних мережах у напрямку збільшення обсягів передачі інформації, швидкості та дальності.

Метою роботи є удосконалення технології, топології та структури пасивної оптичної мережі для підвищення якості широкосмугового доступу. Проаналізовано особливості побудови пасивних оптичних мереж, варіанти їх топології, структури та алгоритмів роботи. Розглянуті технічні можливості стандартів PON, показана ефективність впровадження в новітніх стандартах технології хвильового мультиплексування та багатопозиційних видів модуляції. Виконано аналіз низки видів архітектури WDM-PON та оцінка їх впливу на якість широкосмугового доступу. Проведені розрахунки параметрів та комп'ютерне моделювання оптичної мережі.

Робота містить п'ять розділів. У першому розділі виконано загальний огляд побудови та функціонування мережі PON.

У другому розділі досліджені технічні можливості стандартів PON.

У третьому розділі виконано дослідження впливу різних варіантів архітектури мережі на якість широкосмугового доступу.

У четвертому розділі виконано розрахунки та комп'ютерне моделювання оптичної мережі.

У п'ятому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності реалізації даної науково-дослідної роботи.

ABSTRACT

Zonik K. A. Improving the quality of broadband access in a passive optical network. Master's qualification work in specialty 172 - electronic communications and radio engineering, educational program - telecommunication systems and networks. Vinnytsia: VNTU, 2024. 107 p.

In Ukrainian. Bibliography: 22 titles; fig.: 35; table. 10.

The work is devoted to the study of broadband access in passive optical networks in the direction of increasing the volume of information transmission, speed and range.

The purpose of the work is to improve the technology, topology and structure of a passive optical network to improve the quality of broadband access. The features of the construction of passive optical networks, variants of their topology, structure and algorithms of operation are analyzed. The technical capabilities of PON standards are considered, the effectiveness of the implementation of wave multiplexing technology and multi-position modulation types in the latest standards is shown. An analysis of a number of types of WDM-PON architectures and an assessment of their impact on the quality of broadband access were performed. Calculations of parameters and computer modeling of the optical network were performed.

The work contains five sections. The first section provides a general overview of the construction and operation of the PON network.

The second section examines the technical capabilities of PON standards.

The third section studies the impact of different network architecture options on the quality of broadband access.

The fourth section performs calculations and computer modeling of the optical network.

The fifth section provides an economic justification for the feasibility of implementing this research work.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ...	7
1.1 Загальні положення технології PON	9
1.2 Аналіз топологій пасивних оптичних мереж	10
1.3 Структура та алгоритм роботи пасивної оптичної мережі	13
1.4 Джерела оптичних сигналів технології WDM-PON	20
1.5 Огляд напрямків підвищення якості широкосмугового доступу	24
1.6. Висновки до розділу.....	27
2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СТАНДАРТІВ PON	28
2.1 Перші стандарти PON	28
2.2 Особливості стандартів XG-PON, XGS-PON та NG-PON2	33
2.3 Технічна підтримка якості широкосмугового доступу в PON	42
2.3.1 Аналіз характеристик стандарту XG-PON (XGS-PON)	45
2.3.2 Аналіз характеристик стандарту NG-PON2	48
2.4 Висновки до розділу	51
3 ВПЛИВ АРХІТЕКТУРИ WDM-PON НА ЯКІСТЬ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ	52
3.1 Співіснування WDM-PON та TDM-PON	52
3.2 Композитний PON (CPON)	54
3.3 Локальна мережа маршрутизатора доступу (LARNET)	55
3.4 PON з віддаленим опитуванням термінальної мережі (RITENET)	57
3.5 Багатоступенева архітектура WDM-PON на основі AWG	59
3.6 Архітектура DWDM Super-PON (SPON)	60
3.7 Архітектура SUCCESS-DWA PON	62
3.8 Висновки до розділу	63
4 РОЗРАХУНКИ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ	64
4.1 Розрахунок параметрів оптичної мережі	64
4.2 Моделювання передавання трафіку в PON для одиничного користувача	69

		3
4.3	Моделювання статистичних характеристик агрегованого трафіку	72
4.4	Моделювання методу балансування трафіку між сегментами мережі доступу з урахуванням їх взаємозв'язності	77
4.5	Висновки до розділу	79
5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	80
5.1	Оцінювання наукового ефекту.....	81
5.2	Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	83
5.2.1	Витрати на оплату праці.....	83
5.2.2	Відрахування на соціальні заходи.....	86
5.2.3	Сировина та матеріали.....	86
5.2.4	Розрахунок витрат на комплектуючі.....	88
5.2.5	Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт.....	88
5.2.6	Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт.....	89
5.2.7	Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	89
5.2.8	Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	90
5.2.9	Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	91
5.2.10	Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	92
5.2.11	Інші витрати.....	92
5.2.12	Накладні (загальновиробничі) витрати.....	92
5.3	Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	93
5.4	Висновки до розділу.....	94
	ВИСНОВКИ	95
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97
	Додаток А (обов'язковий) - Ілюстративний матеріал	99
	Додаток Б – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	106

ВСТУП

Актуальність теми. Одна з найбільш поширених оптичних технологій для мереж доступу — це PON (Passive Optical Network) [1-6]. Основна концепція цієї технології полягає у створенні високопродуктивних мереж доступу з мінімальними капітальними витратами. Така мережа зазвичай має деревовидну топологію і складається без активних компонентів, використовуючи лише пасивні оптичні розгалужувачі. Інформація для всіх абонентів передається одночасно за допомогою часової мультиплексії каналів від головної станції — оптичного лінійного терміналу (OLT) — до кінцевих оптичних мережеских одиниць (ONU). Передача та прийом сигналів в обох напрямках здійснюються через одне оптичне волокно, але на різних довжинах хвиль: для прямого потоку (від абонента до станції) використовується хвиля 1310 нм, а для зворотного потоку (від станції до абонента) — 1490 нм або 1550 нм. Потужність сигналу з OLT ділиться серед мережеских вузлів так, щоб на вході всіх ONU рівень сигналу був приблизно однаковим. Часто для передачі телевізійного сигналу виділяється одна з довжин хвиль (зазвичай 1550 нм), при цьому на станції встановлюється оптичний мультиплексор WDM для об'єднання сигналів 1310 нм (для голосу та даних) і 1550 нм (для відео).

Зі зростанням використання Інтернету абонентський попит на пропускну здатність мереж швидко збільшується, що ставить вимогу покращення якості широкосмугового доступу [3-4]. Важливим чинником цього є зростаючий спектр підключених пристроїв, таких як ноутбуки, смартфони, планшети, а також безліч нових пристроїв «розумних будинків» і датчиків, кожен з яких має свої вимоги до підключення. Для постачальників послуг це не лише відкриває великі можливості для розвитку, але й створює суттєві виклики. Одним із таких викликів є обмеження існуючих технологій, таких як мідні та гігабітні пасивні оптичні мережі (GPON), які не забезпечують достатньої ємності для задоволення потреб росту попиту. Однак новіші версії стандарту PON, зокрема пасивна оптична мережа наступного покоління NG-PON2, пропонують потужні

можливості для задоволення вимог до пропускної здатності сучасних мереж.

Актуальність цього дослідження обумовлена постійним збільшенням обсягів інформації, що передається через волоконно-оптичні системи передачі (ВОСП). Ключовим завданням є підвищення пропускної здатності та швидкості передачі сигналу в таких системах. Ці показники залежать від характеристик оптичних хвилеводів, швидкодії електронних і оптоелектронних компонентів, а також від розвитку технологій виготовлення нових матеріалів і виробничих процесів.

Якість лінійного тракту волоконно-оптичних систем передачі значною мірою визначає ефективність доставки інформації через мережу. Для досягнення високих стандартів доставки даних лінійний тракт може бути повністю або частково резервований. Робочі та резервні тракти проектуються відповідно до заданих показників якості, зокрема коефіцієнта помилок передачі двійкових сигналів.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження [5-7] пасивних оптичних мереж (PON) і їхніх алгоритмів націлені на підвищення якості широкосмугового доступу. Вчені аналізують різні аспекти технології PON, включаючи розробку та вдосконалення алгоритмів маршрутизації та управління трафіком, а також оптимізацію розподілу ресурсів. Ведеться розробка нових стандартів, активно досліджується можливість впровадження нових багатопозиційних видів модуляції [6].

Подальші вдосконалення в області алгоритмів технології PON можуть суттєво покращити якість послуг і задовольнити зростаючі потреби сучасного цифрового суспільства.

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є удосконалення технології, топології та структури пасивної оптичної мережі для підвищення якості широкосмугового доступу.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз особливостей побудови пасивних оптичних мереж та формулювання напрямків підвищення якості широкосмугового доступу;

- аналіз технічних можливостей стандартів PON;
- оцінка впливу архітектури WDM-PON на якість широкосмугового доступу;
- розрахунки параметрів та комп'ютерне моделювання оптичної мережі;
- аналіз економічної ефективності досліджень.

Об'єктом дослідження є процеси формування, передачі, прийому та обробки сигналів у рамках відповідних технологій та систем.

Предметом дослідження є методи та засоби, які забезпечують формування, передачу, прийом та обробку сигналів.

Методи досліджень базуються на використанні: теорії багатоканального зв'язку для аналізу ефективності технології хвильового мультиплексування WDM, теорії передачі інформації для оцінки пропускної спроможності хвильових каналів при щільному хвильовому мультиплексуванні.

Новизна одержаних результатів:

а) вперше дана оцінка впливу архітектури мережі на якість широкосмугового доступу;

б) запропоновано використання новітніх стандартів доступу за умови реалізації хвильового мультиплексування та багатопозиційних видів модуляції.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на LIII науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2024 році.

1 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

Пасивні оптичні мережі (PON) є важливою складовою сучасних широкосмугових комунікаційних систем. Вони забезпечують високошвидкісну передачу даних через оптичні волокна, використовуючи пасивні оптичні компоненти, що зменшує потребу в активних елементах мережі та знижує витрати на експлуатацію. Наведемо основні види PON.

1. Ethernet PON (EPON). EPON використовує Ethernet для передачі даних по оптичному волокну. Це рішення часто використовують для широкосмугового доступу в мережах зв'язку. Стандарт EPON зазвичай підтримує швидкості 1 Гбіт/с на абонента в обох напрямках (вгору і вниз) на відстань до 20 км. EPON використовує довжину хвилі 1490 нм для напрямку вниз і 1310 нм для напрямку вгору.

2. Gigabit PON (GPON). GPON підтримує швидкість до 2,5 Гбіт/с на абонента в напрямку до абонента (downstream) і до 1,25 Гбіт/с в напрямку від абонента (upstream). GPON забезпечує більшу пропускну здатність та ефективність у порівнянні з EPON. Швидкість до 2,5 Гбіт/с на downstream і до 1,25 Гбіт/с на upstream на відстань до 20 км. GPON використовує довжину хвилі 1490 нм для напрямку вниз і 1310 нм для напрямку вгору.

3. 10-Gigabit PON (XG-PON). XG-PON є наступним етапом розвитку PON, що підтримує швидкість 10 Гбіт/с на абонента в обох напрямках. Це рішення забезпечує значний приріст швидкості та є корисним для дуже швидкісних і високих навантажень. Отже, швидкість до 10 Гбіт/с на відстань до 20 км. XG-PON використовує довжину хвилі 1577 нм для напрямку вниз і 1270 нм для напрямку вгору.

4. 10-Gigabit Passive Optical Network 2 (XGS-PON). XGS-PON є вдосконаленою версією XG-PON, яка забезпечує симетричну швидкість 10 Гбіт/с як в напрямку до абонента, так і від абонента. Це підходить для сучасних високошвидкісних мереж.

5. Next-Generation PON (NG-PON). NG-PON є подальшим розвитком PON з підтримкою ще вищих швидкостей і нових технологій, таких як Wavelength Division Multiplexing (WDM) для підвищення ефективності використання спектра. Може підтримувати швидкість до 25 Гбіт/с або більше, в залежності від специфікацій. Зокрема, NG-PON2 (Next Generation PON 2) - стандарт, який дозволяє передавати дані зі швидкістю до 40 Гбіт/с на відстань до 40 км. NG-PON2 використовує чотири довжини хвиль: 1575 нм і 1270 нм для напрямку вниз, а також 1590 нм і 1310 нм для напрямку вгору.

Загальні характеристики PON.

1. Безактивна структура. PON використовує тільки пасивні компоненти, такі як розподільчі коробки (splitters), фільтри та розгалужувачі, які не потребують електричної енергії для функціонування. Це зменшує потребу в обслуговуванні та в експлуатаційних витратах.

2. Висока швидкість передачі даних. PON підтримує високі швидкості передачі даних, що робить її придатною для забезпечення широкосмтового доступу до Інтернету та інших послуг.

3. Оптимізація ресурсу. Один оптичний кабель може обслуговувати численні абонентські підключення, що дозволяє ефективно використовувати оптичні волокна і знижувати витрати на інфраструктуру.

4. Низьке енергоспоживання. Мережа не використовує активні елементи, її енергоспоживання є незначним.

5. Масштабованість і гнучкість. PON може легко масштабуватися для обслуговування зростаючих потреб користувачів.

Отже, пасивні оптичні мережі (PON) є потужним інструментом для забезпечення високошвидкісного інтернет-доступу і розширення комунікаційної інфраструктури. Їхня безактивна структура, висока швидкість передачі даних і низьке енергоспоживання роблять їх ідеальним вибором для багатьох сучасних мереж.

1.1 Загальні положення технології PON

PON (Passive Optical Network) - це технологія передачі даних у телекомунікаціях, яка використовує оптичні кабелі та розподільні пристрої для забезпечення доступу до Інтернету та інших мережних сервісів. Спочатку цю технологію запропонувала японська компанія NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) у 1995 році, і вона отримала назву BPON (Broadband PON) [2].

Технологія PON має довгу історію розвитку і постійно вдосконалюється, щоб забезпечити доступ до швидкісного Інтернету, телефонії, високоякісного телебачення та інших мультимедійних сервісів. Основною перевагою PON є те, що вона не потребує активного обладнання в ланцюзі передачі сигналу, що значно знижує витрати на енергоспоживання та обслуговування мережі. Додатково, PON забезпечує високу якість передачі даних і масштабованість, що дозволяє обслуговувати велику кількість користувачів.

Технологія PON вже знайшла широке застосування в багатьох країнах, зокрема в Японії, Кореї, Китаї, Європі та США. В Україні також активно впроваджують цю технологію в мережу зв'язку [2]. Переваги та недоліки впровадження PON детально представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки впровадження технології PON

	Ethernet	EPON	GPON
<i>Переваги</i>	Швидкість	Висока швидкість	Висока швидкість
	Дешевизна	Надійність	Ефективне використання ресурсів
	Широке поширення	Гнучкість	Висока якість послуг
<i>Недоліки</i>	Обмежені можливості	Підвищені витрати на експлуатацію	Складність установки
	Низька якість послуг	Обмежена дальність передачі сигналу	Високі витрати на обладнання

Ця таблиця є корисним інструментом для вибору оптимальної технології для впровадження в мережі передачі даних. Наприклад, якщо головним

пріоритетом є висока якість послуг і швидкість, GPON буде найкращим вибором. У разі, коли важливі гнучкість і надійність, EPON може бути більш підходящим варіантом. Якщо ж основним чинником є вартість, то Ethernet може бути більш прийнятним.

Впровадження технології PON підвищить якість Інтернет-доступу та інших мережних послуг, посилить конкурентоспроможність телекомунікаційних компаній і покращить якість життя користувачів. Однак слід врахувати питання, пов'язані з витратами на впровадження PON, зокрема високу вартість оптичного обладнання і потребу в спеціалізованих кадрах для його обслуговування. Тому важливо провести детальне дослідження ефективності технології PON і порівняти її з іншими технологіями зв'язку, щоб прийняти обґрунтоване рішення щодо її впровадження в конкретному випадку.

1.2 Аналіз топологій пасивних оптичних мереж

Технологія PON (Passive Optical Network) використовує оптичний кабель для прямої передачі сигналу від центральної станції до кінцевих користувачів. Кабель розгалужується на кілька відгалужень, які підключаються до окремих будинків або квартир. Завдяки високій швидкості передачі даних і можливості забезпечення передачі сигналу на великі відстані без значних втрат, PON є однією з найефективніших технологій для передачі даних [3].

Залежно від потреб конкретної мережі, існують різні топології для мережі PON.

1. Топологія зірки (Star PON) – найбільш поширений варіант, при якому кожен кінцевий користувач підключений до центральної станції через окремий оптичний кабель. Це дозволяє управляти кожним з'єднанням індивідуально та підвищує надійність мережі. На рисунку 1.2 зображено топологію зірки.

2. Топологія дерева (Tree PON) – у цій організації оптичний кабель формує структуру дерева: один кабель виходить від центральної станції і розгалужується на кілька кабелів на кожному рівні. Така топологія дозволяє

обслуговувати більше користувачів і ефективніше використовувати оптичний кабель, рисунок 1.3.

3. Топологія кільця (Ring PON) – у цьому випадку оптичний кабель утворює кільцеву структуру, в якій користувачі підключені до кабелю в будь-якому його місці. Це забезпечує резервний шлях, що підвищує надійність мережі, захищаючи її від перебоїв у будь-якому сегменті кабелю.

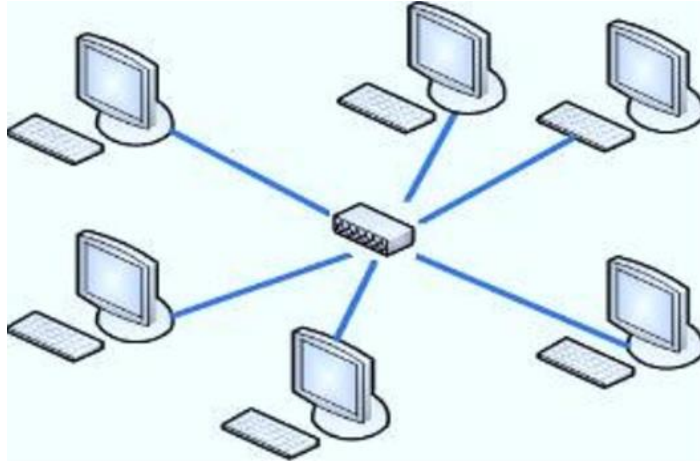


Рисунок 1.2 – Топологія мережі – зірка

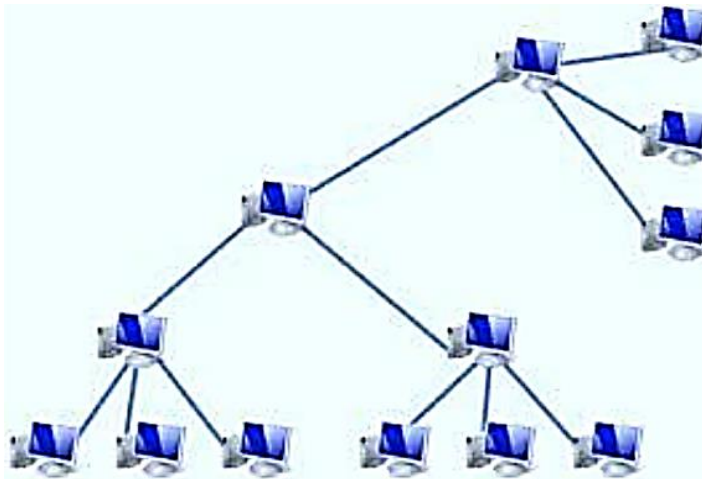


Рисунок 1.3 – Деревоподібна топологія

Для передачі сигналу кільцевою структурою потрібні ретранслятори, що може знизити пропускну здатність мережі. Це пояснюється тим, що сигнал проходить через кожний вузол [3]. На рис. 1.4 зображена дана технологія.

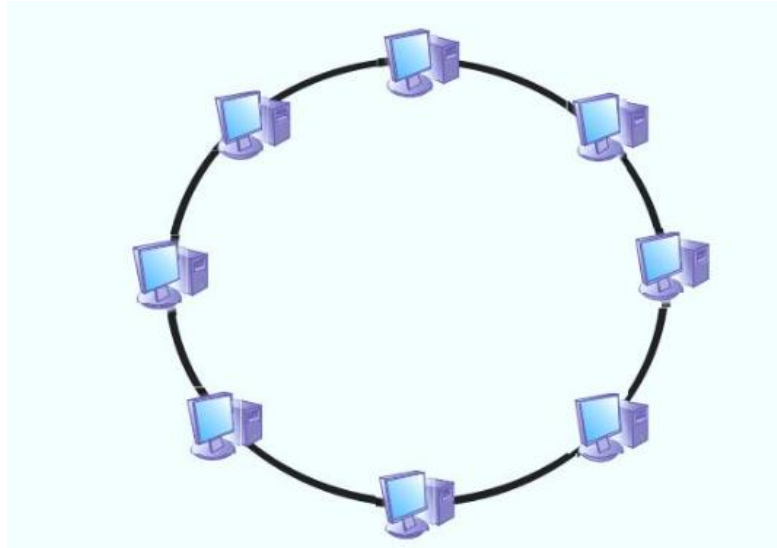


Рисунок 1.4 – Топологія мережі – кільце

Переваги та недоліки топологій мережі PON зведені у таблицю 1.2.

Топологія "зірка" є найбільш поширеною і ефективною, проте вона має обмеження за кількістю користувачів і залежить від центрального вузла.

Топологія "дерево" дозволяє підключати більше користувачів, але також вимагає наявності центрального вузла і може мати проблеми з надійністю у разі його відмови.

Топологія "кільце" забезпечує високу стійкість до відмов і швидку передачу даних, але може бути менш ефективною при великій кількості користувачів і має труднощі з підтриманням сигналу на великих відстанях.

Таким чином, вибір топології для мережі PON залежить від конкретних потреб користувачів і має бути здійснений з урахуванням переваг і недоліків кожного з варіантів.

PON (Passive Optical Network) – це технологія передачі даних, яка використовує оптичні кабелі для доставки сигналів від головної станції до кінцевих користувачів. Основною характеристикою PON є використання пасивної оптичної мережі, що передбачає відсутність елементів, які споживають енергію, на транспортній ділянці мережі.

Таблиця 1.2 – Переваги та недоліки топологій мережі PON

Топологія	Переваги	Недоліки
Зірка	Легка установка, простота в експлуатації, зниження ризику витоку даних, гнучкість управління	Обмежені можливості розширення, висока вартість проведення кабельних робіт, збільшення затримок у мережі при зростанні кількості користувачів
Дерево	Можливість розширення, оптимальне використання кабельних з'єднань, зменшення часу затримки, забезпечення якості обслуговування (QoS)	Необхідність планування приєднання користувачів, складніша установка і обслуговування, відсутність резервування у разі відмови вузла
Кільце	Можливість розширення, зменшення часу затримки, забезпечення якості обслуговування (QoS), відсутність єдиної точки відмови	Обмежені можливості розширення, складності у встановленні та обслуговуванні, потреба уникати вузлів з єдиною точкою відмови, потенційні проблеми з управлінням мережею

1.3 Структура та алгоритм роботи пасивної оптичної мережі

Концепція архітектури PON полягає у використанні єдиного приймально-передавального модуля для передачі та отримання інформації між центральним вузлом оператора та абонентськими пристроями. На рисунку 1.5 представлені основні компоненти структури PON.

Центральний вузол (оптичний лінійний термінал (OLT)), розташовується у центральному офісі. Через інтерфейси сервісних вузлів (Service Node Interfaces, SNI) цей пристрій отримує дані з магістральних мереж та передає низхідний потік до абонентських вузлів (прямий потік) за допомогою PON-дерева [4].

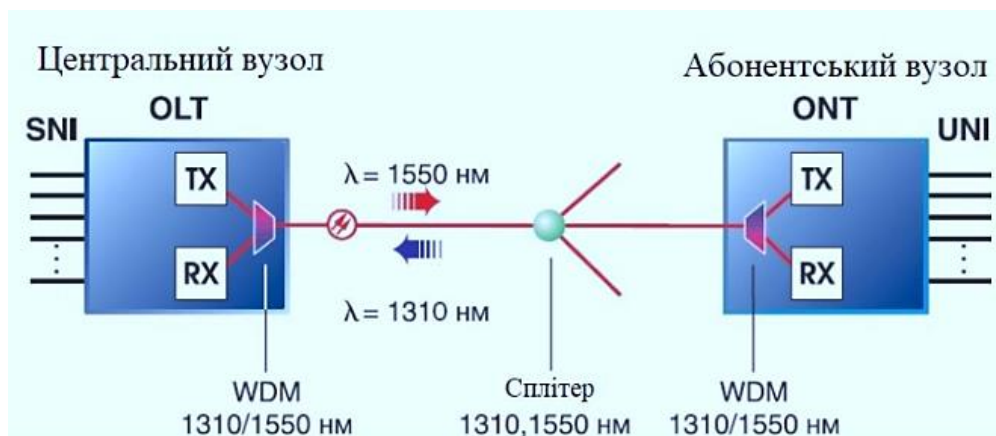


Рисунок 1.5 – Структура та основні елементи мережі PON

Абонентський вузол або оптичний мережевий термінал (ONT) обладнаний інтерфейсами для підключення абонентського обладнання та інтерфейсом для з'єднання з PON-деревом. Передача даних у напрямку від ONT до OLT здійснюється на довжині хвилі 1550 нм (низхідний потік), а у зворотному напрямку – на довжині хвилі 1310 нм (висхідний потік). ONT отримує дані від OLT, обробляє їх і передає абонентам через інтерфейси "користувач-мережа" (UNI).

Оптичний розгалужувач є пасивним пристроєм, що розподіляє оптичне випромінювання в одному напрямку та об'єднує кілька потоків у зворотному напрямку. Розгалужувачі можуть мати M входів та N виходів (де N – кількість абонентів). Найчастіше в мережах PON використовуються розгалужувачі типу 1х з одним входом. Розгалужувачі типу 2х можуть застосовуватися в системах з резервуванням волокна.

Оптичний лінійний термінал (OLT) і оптичний мережевий термінал (ONT) обладнані вбудованими WDM-мультиплексорами, які розділяють висхідні та низхідні потоки даних. Ці мультиплексори мають низькі втрати і не потребують температурної стабілізації. На рисунку 1.5 показані основні компоненти архітектури PON. OLT є центральним вузлом, розташованим у центральному офісі. Цей пристрій отримує дані від магістральних мереж через інтерфейси сервісних вузлів (SNI) і формує низхідний потік до ONT через PON-

дерево. PON-дерево складається з оптичного волокна, що починається від центрального вузла, і невеликої кількості оптичних розгалужувачів, які розподіляють сигнал між ONT.

Кожен ONT має інтерфейси для підключення до абонентського обладнання та інтерфейс для з'єднання з PON-деревом. Довжина хвилі для передачі даних від OLT до ONT становить 1310 нм, а для передачі від ONT до OLT – 1550 нм. В OLT і ONT встановлені WDM-мультиплексори, які розділяють висхідні та низхідні потоки даних, що дозволяє передавати дані в обох напрямках через одне оптичне волокно без потреби у додаткових волокнах.

Кожен ONT отримує широкий низхідний потік даних і вибирає свою частину інформації з загального потоку на основі адресних полів (див. рисунок 1.6).

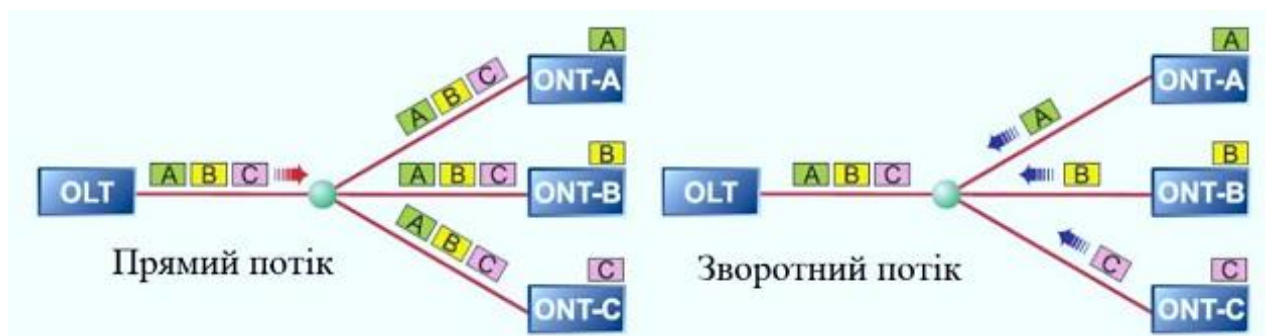


Рисунок 1.6 – Структура передачі низхідних та висхідних потоків у PON

У зворотному потоці всі ONT передають дані на одній довжині хвилі, застосовуючи TDMA. Щоб уникнути перехресних сигналів між різними ONT, кожному з них призначається індивідуальний графік передачі, який враховує затримку, пов'язану з відстанню до центрального вузла OLT.

Протокол MPCP, розроблений групою IEEE 802.3ah, дозволяє OLT управляти часовими доменами. Цей протокол використовує два типи Ethernet-повідомлень: GATE та REPORT. Повідомлення GATE передається від OLT до

ONU для призначення часового домена, тоді як REPORT використовується ONU для передачі інформації про свій стан (наприклад, заповненість буфера) до OLT, що допомагає останньому у визначенні часового домена. Для повідомлень GATE та REPORT використовуються кадри керування MAC типу 88-08.

Отже, алгоритм роботи мережі PON після налаштування виглядає наступним чином:

- ONU «прослуховує лінію»;
- OLT отримує пакет стандарту IEEE 802.3 з глобальної мережі і модифікує його відповідно до стандарту IEEE P802.3ah;
- OLT надсилає модифікований пакет конкретному ONU;
- Усі ONU отримують пакет, але лише призначений отримувач зберігає його у буфері, решта пакунків відкидаються;
- ONU форматує пакет зі стандарту IEEE P802.3ah у формат IEEE 802.3 і передає його клієнтському ПК;
- Пакети, отримані від клієнтського ПК, переформатовуються з IEEE 802.3 у IEEE P802.3ah і зберігаються у буфері ONU;
- OLT дозволяє передачу даних конкретному ONU;
- ONU передає накопичені пакети, після чого «замовкає» та знову «прослуховує» лінію;
- OLT отримує пакет від ONU, конвертує його з формату IEEE P802.3ah у формат IEEE 802.3 і надсилає його до пристрою вищого рівня у глобальній мережі.

Рисунок 1.7 демонструє процес перетворення пакетів у мережі PON.

Під час передачі даних від OLT до ONT, інформаційні пакети об'єднуються в об'ємні блоки та передаються через оптичний канал до ONT. В процесі передачі оптичний сигнал направляється до розгалужувача, який приймає пакети та передає їх до абонентського обладнання.



Рисунок 1.7 – Процес перетворення пакетів у мережі PON

У зворотному напрямку пакети даних від абонентського обладнання передаються через OLT до OLT. Для ефективного управління оптичним каналом PON застосовує протоколи TDMA (Time Division Multiple Access), які дозволяють розподілити канал на часові слоти. Для управління доступом OLT до оптичного каналу використовується протокол MPCP (Multi-Point Control Protocol), який забезпечує контроль з боку OLT.

Таким чином, алгоритм роботи PON включає передачу даних від OLT до OLT та навпаки, через оптичні волоконні лінії і пасивні компоненти, такі як розгалужувачі. Під час цієї передачі протокол TDMA забезпечує розподіл оптичного каналу на часові інтервали.

Архітектурне рішення FTTH на базі PON передбачає використання оптичного волокна для передачі сигналів до кінцевих абонентів. PON є технологією, що дозволяє використовувати один оптичний кабель для доставки сигналів до багатьох абонентів.

Система PON включає два основних пристрої: оптичний лінійний термінал (OLT), який забезпечує з'єднання з магістральною мережею, та оптичний мережевий термінал (ONT), що розміщується в будинках або офісах абонентів для підключення до Інтернету.

Мережа FTTH на основі технології PON складається з трьох основних компонентів (див. рисунок 1.8):



Рисунок 1.8 – Створення оптичної мережі доступу на основі рішення FTTH PON

1. Станційна ділянка включає активне обладнання OLT (Optical Line Terminal) та оптичний крос високої щільності ODF (Optical Distribution Frame), яке встановлюється на вузлі зв'язку в приміщенні провайдера.

2. Абонентська ділянка охоплює персональне підключення абонента через одно- або двоволоконний дроп-кабель від загальних розподільчих пристроїв до оптичної розетки та активне обладнання ONT (Optical Network Terminal) в приміщенні абонента.

3. Лінійна ділянка складається з волоконно-оптичного кабелю, шаф, сплітерів, конекторів та з'єднувачів, що розміщені між станційною та абонентською ділянками.

Будівництво лінійної ділянки є найбільш складною частиною створення мережі, оскільки вона включає різноманітне пасивне обладнання і потребує великої кількості будівельно-монтажних робіт. Тому важливо використовувати найефективніші методи будівництва.

Планування топології пасивної оптичної мережі включає проектування лінійної ділянки. У розподільчій мережі PON передача даних від оптичних розподільчих шаф до кінцевих пристроїв абонентів (ONT) здійснюється за допомогою пасивних оптичних розгалужувачів (сплітерів), які встановлюються в оптичних розподільчих коробках, шафах або муфтах (див. рисунок 1.9).

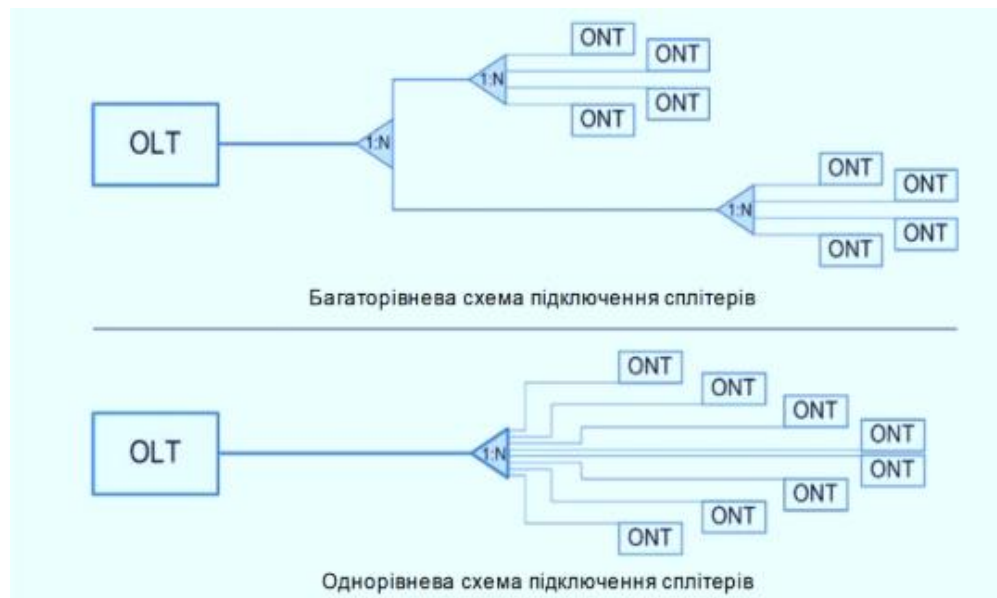


Рисунок 1.9 – Схеми включення сплітерів у мережі PON

Кількість рівнів каскадування може бути як однорівневою, так і багаторівневою, з послідовним підключенням сплітерів один за одним. Вибір кількості рівнів залежить від загального згасання від сплітерів, коефіцієнта розгалуження PON та вимог до пропускної здатності для кожного абонента. Зазвичай застосовуються каскадні схеми з одним або двома рівнями. Зі збільшенням кількості рівнів підвищується підтримка передачі даних, але знижується якість обслуговування абонентів. Зменшення кількості рівнів каскадування дозволяє зменшити внесок сплітерів у втрату сигналу та збільшити дальність передачі.

Таблиця 1.3 відображає проблеми, пов'язані з побудовою мереж FTTH на основі технології PON.

Аналізуючи дані таблиці, можна дійти висновку, що цей підхід має низку переваг, таких як зменшення витрат на кабелі та порти, а також можливість передачі аналогового відеосигналу. Однак, при застосуванні цієї технології можуть виникнути певні технічні та фінансові труднощі, які потрібно враховувати при розгортанні мережі. Наприклад, можуть з'явитися труднощі з отриманням дозволів на проведення робіт, проблеми з вибором оптимальної

топології та забезпеченням надійності мережі при великих відстанях між абонентами.

Попри ці виклики, впровадження FTTH мереж на основі технології PON розглядається як перспективне та ефективне рішення для створення швидкісних і надійних мереж доступу.

Таблиця 1.3 – Проблеми, пов'язані з впровадженням технології FTTH на основі PON

Проблема	Опис
Вартість	Створення мережі на основі технології PON вимагає значних витрат на закупівлю та налаштування обладнання, що може призвести до високих витрат для провайдера та кінцевого користувача.
Інфраструктура	Реалізація мережі PON передбачає наявність оптичної інфраструктури, яка може бути складною для впровадження в деяких регіонах або навіть недоступною.
Проблеми зберігання даних	У мережах PON можуть виникати проблеми із захистом даних після завершення підключення користувачів до спільної лінії, що може створювати ризики конфіденційності та безпеки інформації.
Технічні проблеми	Під час експлуатації таких мереж можуть виникати технічні проблеми, такі як втрата сигналу або перешкоди, які негативно впливають на якість обслуговування.
Потенційні проблеми зі змінами	Мережі PON можуть виявитися менш гнучкими та адаптивними до змін, таких як збільшення обсягу трафіку або зміна технологій передачі даних.
Питома місткість	Можливості мережі PON щодо масштабування можуть бути обмеженими, особливо при високому попиті на широкомасштабні послуги.

1.4 Джерела оптичних сигналів технології WDM-PON

Розробник системи WDM-PON має приймати рішення щодо вибору відповідних довжин хвиль і їх відстаней, що вплине на вибір обладнання. Існують два основних типи довжин хвиль: груба WDM (CWDM) та щільна WDM (DWDM) PON. У системі використовуються OLT та ONU, оснащені

оптичними передавачами, приймачами, мультиплексорами і демультимплексорами.

Основний недолік CWDM полягає в обмеженій кількості каналів, що ускладнює масштабування CWDM-PON, особливо при використанні стандартного одномодового волокна з високим піковим затуханням. Крім того, канали з коротшою довжиною хвилі мають більші втрати, що обмежує відстань передачі або коефіцієнт розщеплення. Наприклад, у службі PON «triple-play» канал 1550 нм використовується для відео CATV, 1490 нм для голосового зв'язку, а 1310 нм для зворотного зв'язку. Розширена програма може використовувати CWDM-канали 1360–1480 нм для бізнес-послуг, в той час як звичайні послуги трійного пакету надаються звичайним абонентам.

DWDM (щільний WDM) має значно менший інтервал довжин хвиль, зазвичай менше 3,2 нм, що дозволяє передавати більше довжин хвиль в обмеженому спектрі, де застосовується ербієвий волоконний підсилювач (EDFA). У системі DWDM-PON важливо ретельно контролювати довжину хвилі кожного оптичного джерела та центральну довжину хвилі фільтра WDM, щоб уникнути перехресних перешкод між сусідніми каналами. Це робить розгортання DWDM-PON дорожчим у порівнянні з CWDM-PON, оскільки потребує використання пристроїв, точно налаштованих на певні довжини хвиль, а також системи контролю температури.

Окремі джерела з фіксованою довжиною хвилі не є найкращим вибором для OLT у системах WDM-PON через необхідність використання великої кількості індивідуальних оптичних джерел для генерації різних довжин хвиль. Натомість, компоненти, які можуть генерувати кілька хвиль одночасно, є значно більш корисними для OLT. Такі можливості надають багатоканальні WDM-джерела, які можна інтегрувати в компактний пристрій та налаштувати одночасно. Ось три приклади таких джерел:

1. Багаточастотний лазер (MFL). Цей пристрій поєднує решітки AWG (Arrayed Waveguide Grating) та підсилювачі для вибору та підсилення довжини хвилі відповідно. Дзеркала на скошених гранях формують оптичну порожнину

лазерних діодів. Коли AWG налаштований, він може змінювати цільові довжини вихідних хвиль. Пристрій, який використовує цю схему, може інтегрувати до 18 каналів WDM. Він також може працювати як настроюваний лазер, увімкнувши кожен підсилювач. Хоча цей пристрій підтримує пряме модуляційне управління, його довга оптична порожнина обмежує частотну модуляцію.

2. Матриці DFB LD, рисунок 1.10. Цей метод інтегрує кілька джерел довжини хвилі, поєднуючи механізм підсилення та налаштування в одному модулі LD (Laser Diode). Тонкоплівкові резистори використовуються для налаштування довжини хвилі шляхом контролю температури. Переваги цього підходу включають компактність і швидкість модуляції. Проте, точне налаштування кожного каналу на потрібну довжину хвилі може бути складним через використання незалежних фільтрів для кожної довжини хвилі. Цей метод є більш придатним для систем з невеликою кількістю каналів завдяки використанню різних типів решіток в межах однієї мікросхеми.

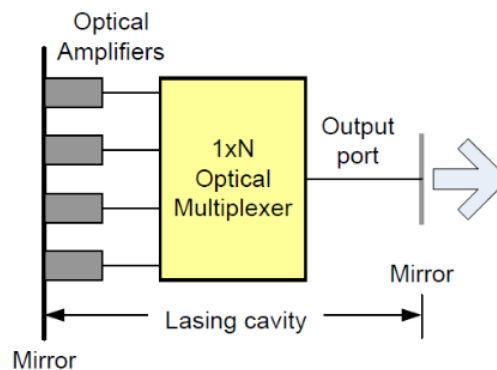


Рисунок 1.10 – Джерело з кількома хвилями [7]

3. Генератор коротких імпульсів, рисунок 1.11, в парі з волокном, може бути використаний як джерело WDM. Наприклад, гаусівський імпульс тривалістю 100 фс від ербієвого волоконного лазера з модульованою заблокованою моделлю може забезпечити спектральну смугу частот до 4,4 ТГц, що дозволяє розмістити 44 канали WDM на відстані 100 ГГц один від одного. Після цього волокно виконує функцію дисперсії, що розширює імпульс у часі. Коли цей імпульс модулюється і подається на розгалужувач WDM, різні канали

з окремою інформацією виходять з різних портів. Проте кількість каналів обмежена співвідношенням частоти модуляції даних до частоти повторень лазера. Тому цей метод найбільше підходить для ситуацій, де потрібно багато каналів WDM, але швидкість передачі даних у кожному каналі не є високою. Проте перед комерційним впровадженням цього рішення слід вирішити такі завдання, як вирівнювання ширини імпульсу, часова ширина та вільний спектральний діапазон (FSR) WDM.

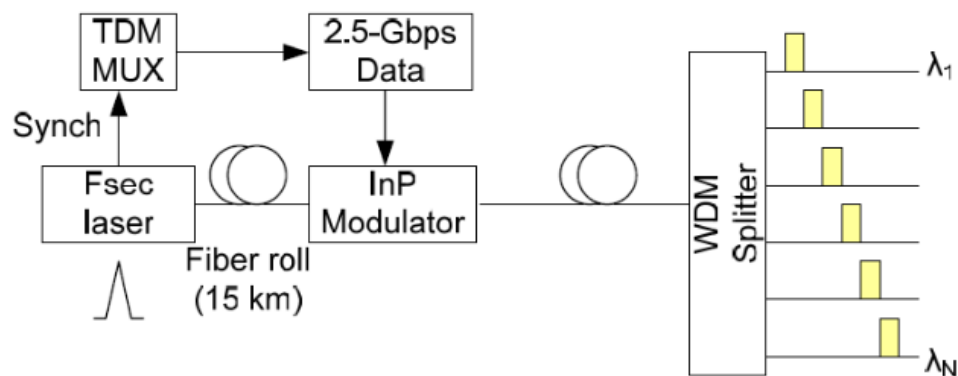


Рисунок 1.11 — Генератор коротких імпульсів

Деякі дослідники намагалися уникнути використання оптичних джерел у ONU, оскільки управління довжинами хвиль на кожному ONU вважалося ризикованим і дорогим. Зміна довжини хвилі одного оптичного джерела може вплинути не лише на власний канал, а й на сусідні. Як альтернатива, пропонувалося забезпечити всі оптичні джерела з OLT, а ONU транслювали б ці сигнали без модулювання. Іноді один канал довжини хвилі використовувався для обох напрямків, створюючи рішення з спільним джерелом, де модуляція відбувалася тільки частково в часовій області для низхідного потоку, а для висхідного потоку залишалася немодульованою. Для цього застосовувалися два типи модуляторів: зовнішній модулятор і напівпровідниковий оптичний підсилювач (SOA). Коли оптичний сигнал йшов вниз, частина його направлялася на зовнішній модулятор, що дозволяло високошвидкісну модуляцію для передачі у верхньому потоці. Варто також враховувати, що вартість модулятора в кожному ONU може стати перешкодою для практичного

впровадження. Було запропоновано використовувати SOA відбивального типу, який може компенсувати втрати сигналу в обох напрямках як спільне джерело. Проте вартість SOA залишає проблему, яку потрібно вирішити перед комерціалізацією цього рішення.

1.5 Огляд напрямків підвищення якості широкосмугового доступу

Сімейство технологій PON пройшло декілька фаз свого розвитку, незмінно покращуючи свої споживчі характеристики. З'являлися нові вимоги щодо пропускної здатності і це відображалось у нових стандартах. Аналізуючи еволюцію розвитку цієї технології, можна сформулювати завдяки яких факторів та технологічних рішень стає реальністю підвищення якості широкосмугового доступу в PON. Ось основні з них:

1. Покращення характеристик оптичного волокна. Напрямок, очевидно, пов'язаний з технологією виготовлення волоконно-оптичних кабелів та будівництвом з їх використанням телекомунікаційних мереж. При цьому намагаються досягти:

- Зменшення втрат сигналу - використання високоякісних оптичних волокон зі зниженою дисперсією та зниженими втратами сигналу дозволяє передавати дані на більші відстані без значних втрат якості.

- Покращення якості з'єднань - якісні спайки волокон і добре виконані з'єднання можуть зменшити втрати сигналу та покращити стабільність мережі.

2. Оптимізація розподілу ресурсів (ресурси оптичного каналу). Ресурс оптоволокна з точки зору досяжної швидкості передачі інформації дуже великий. Був період, коли вважалося, що цей ресурс повною мірою використати буде неможливо, тобто у цьому не буде потреби. Але час змінив цю думку. І найновішими стандартами уже передбачаються нові технологічні рішення.

- Кодування та модуляція - використання ефективніших схем кодування та модуляції дозволяє збільшити пропускну здатність та стійкість до шуму в мережі. Наприклад, застосування таких технологій як QAM (Quadrature

Amplitude Modulation) дозволяє передавати більше біт на одиницю часу – збільшити спектральну ефективність.

- Мультиплексування (WDM) - використання мультиплексування по довжині хвилі (WDM, wavelength-division multiplexing) дозволяє передавати кілька каналів з різними довжинами хвиль через одне оптичне волокно. Це дозволяє значно збільшити пропускну здатність мережі.

3. Покращення апаратного забезпечення. Очевидно, що технічні параметри обладнання, що знаходиться як у провайдера, так і у абонента (з обох сторін волоконно-оптичної системи передачі) повинні підтримувати технології, які передбачені новими стандартами.

- Кращі OLT і ONT/ONU пристрої - використання більш потужних та сучасних оптичних лінійних терміналів (OLT) та абонентських пристроїв (ONT/ONU) забезпечує більшу стабільність з'єднання та швидкість передачі даних. Оновлення обладнання, яке підтримує нові стандарти, може підвищити продуктивність.

- Технології передачі з високою швидкістю - використання нових стандартів, таких як XG-PON (10-Gigabit Passive Optical Network) або NG-PON2 (Next Generation PON), дозволяє досягати більших швидкостей передачі даних порівняно з традиційними PON-системами.

4. Оптимізація топології мережі.

- Зменшення кількості користувачів на одну оптичну лінію - у багатьох випадках PON використовує пасивні оптичні сплітери для розподілу сигналу серед кількох користувачів. Зменшення кількості абонентів на одну лінію може підвищити загальну якість і пропускну здатність каналу.

- Балансування навантаження - використання технологій динамічного управління трафіком та балансування навантаження між різними точками доступу може знизити затримки та збільшити ефективність мережі.

5. Технології управління якістю обслуговування (QoS).

- Управління трафіком - впровадження інтелектуальних механізмів для управління трафіком і пріоритезації даних (Quality of Service, QoS) дозволяє

забезпечити високий рівень обслуговування для критичних додатків (наприклад, для голосових чи відео дзвінків) та одночасно підтримувати хорошу якість для менш вимогливих застосунків.

- Моніторинг і адаптивне управління - використання сучасних систем моніторингу для виявлення затримок, втрат пакетів або перевантаження мережі дозволяє своєчасно коригувати налаштування для підтримки оптимальної якості.

6. Покращення енергоефективності.

- Енергоефективне обладнання - використання обладнання, яке оптимізує споживання енергії, може знизити рівень перешкод і перегріву, що покращить стабільність роботи системи та зменшить рівень шуму.

7. Програмне забезпечення для оптимізації мережі.

- Аналіз та оптимізація роботи мережі - використання передових алгоритмів для аналізу поточного стану мережі та автоматичної корекції її параметрів може допомогти підтримувати високу якість зв'язку в реальному часі.

- Системи управління мережею (NMS) - інтелектуальні платформи для управління та моніторингу мережі можуть автоматично виявляти та виправляти проблеми, що дозволяє знизити ймовірність збоїв.

У комплексі, ці заходи можуть значно покращити як якість, так і швидкість широкопasmового доступу в PON.

Частина зазначених напрямків лежить у площині стану розвитку елементної бази, удосконалення технології виготовлення світловодів, покращення програмного забезпечення тощо. Ці питання виходять за рамки даної роботи. Ми у подальшому торкнемось лише важливих системних питань, з впровадження яких стартує новий відчутний крок у підвищенні якості широкопasmового доступу в оптичних пасивних мережах: використання нових стандартів XG-PON та NG-PON2, хвильове мультиплексування WDM,

1.6 Висновки до розділу

Основні елементи пасивних оптичних мереж (PON): оптичний лінійний термінал (OLT), оптичний розгалужувач (ONU) та оптичний модем – абонентський вузол (ONT) - забезпечують передачу сигналів між провайдером та абонентом за допомогою оптичного волокна.

Розглянуто основні характеристики технології PON, види топології мереж, структуру та алгоритм функціонування, а також побудову та режими роботи джерел випромінювання для технології WDM-PON.

Зазначається, що основним недоліком CWDM є невелика кількість каналів, що обмежує масштабованість CWDM-PON, особливо при використанні звичайного одномодового волокна. Крім цього, у CWDM канали з коротшою довжиною хвилі стикаються зі значними втратами, що обмежує відстань передачі для технології у цілому. У DWDM дискрет довжин хвиль зазвичай менше 3,2 нм, тому каналів передачі можна сформувати більше. Таким чином, DWDM-PON буде дуже корисним для забезпечення достатньої пропускної спроможності для багатьох абонентів і розглядається як перспективна система PON.

Проведено огляд напрямків підвищення якості широкосмугового доступу, які базуються на новітніх стандартах XG-PON та NG-PON2.

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СТАНДАРТІВ PON

2.1 Перші стандарти PON

Оптичні мережі доступу (OAN) розгортаються, як правило, за допомогою однієї з трьох різних топологій: точка-точка (P2P), кільце чи точка-багатоточка (P2MP), як показано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Варіанти топологій

Серед трьох архітектур P2MP (Point-to-MultiPoint) архітектура на основі PON стала найбільш популярною серед операторів для розгортання технологій Fibre to X (FTTx), оскільки вона зазвичай дозволяє знизити витрати на інфраструктуру. Завдяки використанню P2MP один волоконно-оптичний канал, що спільно використовується, транспортує трафік до пасивного розподільного комплексу, розташованого ближче до кінцевих користувачів. Цей комплекс може бути як одноступеневим, так і каскадним. Таким чином, немає потреби прокладати окремі оптичні волокна на всьому шляху від центрального офісу до кожного клієнта. Така архітектура була стандартизована у першій специфікації ATM-PON G.983.1, яка була опублікована в 1998 році Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ-Т). З того часу стандарт регулярно оновлюється, щоб відповідати зростаючим вимогам до смуги пропускання. Це призвело до появи кількох варіантів реалізації PON, при цьому останні стандарти забезпечують симетричну пропускну здатність 10 Гбіт/с у двох напрямках на спільній смузі

пропускання. На рисунку 2.2 продемонстровано еволюцію стандарту PON від його першого випуску.

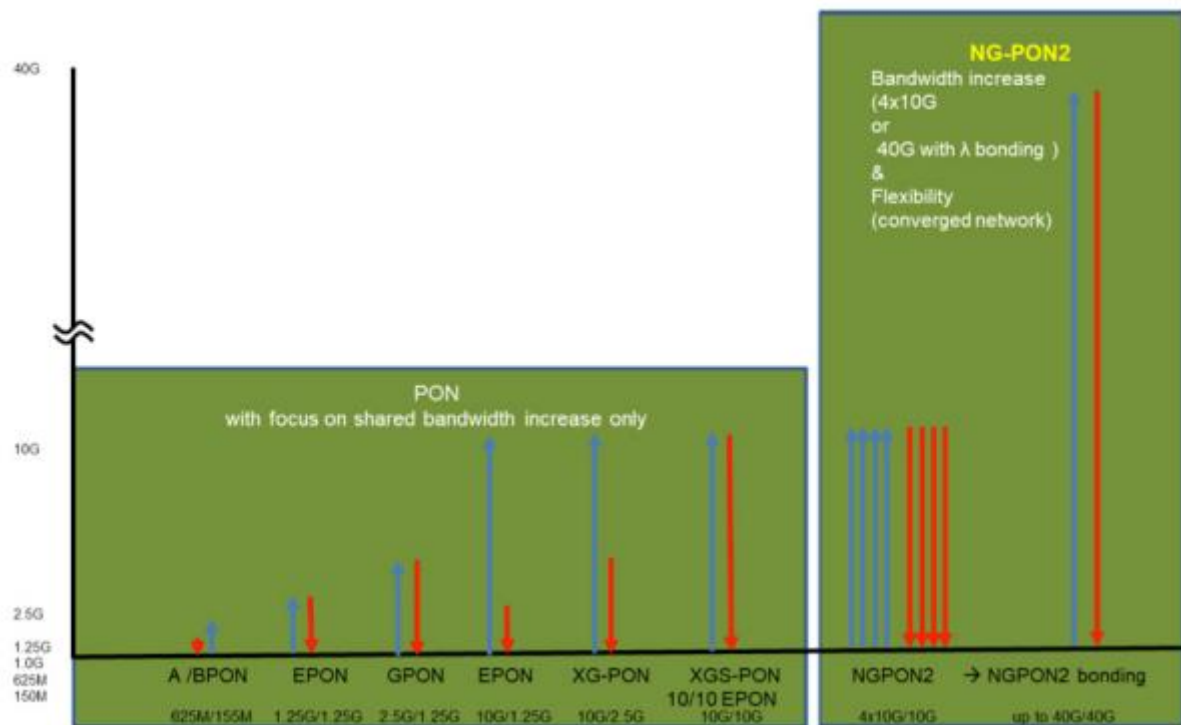


Рисунок 2.2 – Розвиток стандартів PON

Перші кроки в розвитку технології PON були зроблені у 1995 році, коли впливова група з семи компаній (British Telecom, France Telecom, Deutsche Telecom, NTT, KPN, Telefónica і Telecom Italia) створила консорціум для реалізації ідеї множинного доступу через одне оптичне волокно. Ця неформальна організація, підтримувана ITU-T, отримала назву FSAN (Full Service Access Network). Наприкінці 90-х років до FSAN приєдналося багато нових учасників — як операторів, так і виробників обладнання. Метою FSAN було розробити загальні рекомендації та вимоги до обладнання PON, щоб забезпечити співпрацю між виробниками та операторами на конкурентному ринку систем доступу PON. На сьогодні FSAN налічує 40 учасників та активно співпрацює з такими організаціями зі стандартизації, як ITU-T, ETSI та ATM Forum.

У середині 90-х років широко поширювалась думка, що лише протокол ATM здатний забезпечити належну якість послуг зв'язку (QoS) для кінцевих

абонентів. Тому FSAN, прагнучи забезпечити транспорт мультисервісних послуг через мережу PON, вибрав ATM як основну технологію. У результаті у жовтні 1998 року був затверджений перший стандарт ITU-T G.983.1, який базувався на транспортуванні ATM-осередків у деревоподібній мережі PON та отримав назву APON (ATM PON). Протягом наступних років з'явилося кілька нових поправок і рекомендацій у серії G.983.x ($x = 1-7$), з поступовим збільшенням швидкості передачі до 622 Мбіт/с.

У березні 2001 року була опублікована рекомендація G.983.3, яка додавала нові функції до стандарту PON:

- підтримка передачі різноманітних додатків (голос, відео, дані), що дозволяло виробникам додавати необхідні інтерфейси на OLT для підключення до магістральної мережі та на ONT для підключення до кінцевих абонентів;
- розширення спектрального діапазону, що відкривало можливості для надання додаткових послуг на інших довжинах хвиль в межах того ж дерева PON, наприклад, телебачення на третій довжині хвилі (так звана «три в одному» або triple play).

Таким чином, після розширення стандарту APON він отримав нову назву — BPON (Broadband PON). Устаткування BPON різних виробників підтримує магістральні інтерфейси, такі як SDH (STM-1), ATM (STM-1/4), Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, відео (SDI PAL), а також абонентські інтерфейси E1 (G.703), Ethernet 10/100Base-TX і телефонію (FXS). Зважаючи на широкий характер прямого потоку в дереві PON та можливість несанкціонованого доступу до даних з боку ONT, для захисту даних в APON була передбачена технологія шифрування з використанням відкритих ключів для передачі інформації у прямому потоці.

У листопаді 2000 року комітет LMSC (LAN/MAN Standards Committee) IEEE створив спеціальну комісію під назвою EFM (Ethernet in the First Mile, або Ethernet на першій милі) 802.3ah, реалізуючи тим самим побажання багатьох експертів щодо розробки архітектури мережі PON, яка була б найбільш сумісна з широко використовуваними на той час мережами Ethernet. У грудні 2001 року

був утворений альянс EFMA (Ethernet in the First Mile Alliance), який переважно займався дослідженням індустріальних та комерційних аспектів нової технології. Метою спільної роботи було досягнення консенсусу між операторами та виробниками обладнання та розробка стандарту IEEE 802.3ah, повністю сумісного з магістральним пакетним кільцем IEEE 802.17.

Комісія EFM 802.3ah мала на меті стандартизацію трьох основних рішень:

- EFMC (EFM Copper) — рішення "точка-точка" на основі витих мідних пар. З двох альтернативних технологій (G.SHDSL та ADSL+), які змагалися за впровадження, було вибрано G.SHDSL.

- EFMF (EFM Fiber) — рішення для з'єднання "точка-точка" по оптичному волокну. Тут передбачалося стандартизувати різні варіанти з'єднань: "дуплекс по одному волокну на однакових довжинах хвиль", "дуплекс по одному волокну на різних довжинах хвиль", "дуплекс по парі волокон", а також нові варіанти оптичних приймачів. Подібні рішення вже кілька років пропонувалися рядом компаній як «приватні» технології.

- EFMP (EFM PON) — рішення для з'єднання "точка-багатоточка" по оптичному волокну. Це рішення, яке є альтернативою APON, отримало назву EPON (Ethernet PON). EPON — це мережа PON, що транспортує дані, інкапсульовані в Ethernet-кадри (за стандартом IEEE 802.3), з використанням каналного кодування 8B/10B (8 біт даних перетворюються в 10 біт каналних). Підтримка технології EPON обґрунтована орієнтацією мережі Інтернет на протокол IP та стандарти Ethernet.

Архітектура мережі доступу GPON є розвитком технології APON. Вона дозволяє збільшити смугу пропускання мережі PON та підвищити ефективність передачі різноманітних додатків. Стандарт GPON забезпечує масштабовану структуру кадрів з швидкостями передачі від 622 Мбіт/с до 2,5 Гбіт/с і підтримує як системи з однаковою швидкістю передачі в обох напрямках у дереві PON, так і системи з різними швидкостями для прямого та зворотного потоку. GPON базується на стандарті ITU-T G.704.1 GFP, що забезпечує

інкапсуляцію різних типів сервісів, зокрема TDM, в синхронний транспортний протокол. Якщо SDH (Synchronous Digital Hierarchy) реалізується лише при статичному розподілі смуги пропускання, то GFP дозволяє динамічно розподіляти смугу, зберігаючи при цьому структуру кадру SDH.

Таблиця 2.1 – Узагальнені характеристики стандартів PON

Характеристики	APON (BPON)	EPON	GPON
Інститути стандартизації	ITU-T SG15/FSAN	IEEE/EFMA	ITU-T SG15/FSAN
Дата прийняття стандарту	10. 1998	07. 2004	10. 2003
Стандарт	ITU-T G.981. x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984. x
Швидкість передачі, прямий/зворотний потік, Мбіт/с	155/155 622/155 622/622	1000/1000	1244/155,622,1244 2488/622,1244, 2488
Базовий протокол	ATM	Ethernet	SDH
Лінійний код	NRZ	8B/10B	NRZ
Максимальний радіус мережі, км	20	20 (>30)	20
Максимальне число абонентських вузлів на одне волокно	32	16	64 (128)
Додатки	будь-які	IP, дані	будь-які
Корекція помилок FEC	передбачена	нема	необхідна
Довжини хвиль прямого/зворотного потоків, нм	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1310/1310)	1550/1310 (1480/1310)
Динамічний розподіл смуги	є	підтримка	є
IP-фрагментація	є	нема	є
Захист даних	шифрування відкритими ключами	нема	шифрування відкритими ключами
Резервування	є	нема	є
Оцінка підтримки голосових додатків і QoS	висока	низька	висока

Впровадження технології PON значно покращує якість доступу до Інтернету та інших мережевих послуг, підвищує конкурентоспроможність телекомунікаційних компаній і сприяє загальному покращенню якості життя користувачів. Однак, існують певні виклики, пов'язані з витратами на впровадження цієї технології, зокрема через високу вартість оптичного

обладнання та необхідність у спеціалізованих кадрах для його обслуговування. Оскільки ранні стандарти PON залишаються актуальними і використовуються в багатьох випадках, їх коротка характеристика є важливою і корисною для розуміння етапів еволюції технології. Ці стандарти заклали основи для подальшого розвитку систем доступу і мають значний вплив на сучасні реалізації PON. В таблиці 2.1 наведено узагальнені характеристики цих стандартів.

2.2 Особливості стандартів XG-PON, XGS-PON та NG-PON2

Сімейство технологій PON, про яке вже були згадані деякі особливості та переваги, пройшло кілька етапів розвитку, постійно вдосконалюючись. У відповідь на зростаючі вимоги до пропускної здатності, логічним кроком стало створення нових стандартів, таких як XG-PON та XGS-PON.

XG-PON (10G-PON) — це оновлений стандарт для пасивних оптоволоконних мереж, який забезпечує швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с, дозволяючи швидко передавати великі обсяги інформації та обслуговувати численні пристрої Інтернету.

XGS-PON є еволюцією XG-PON і представляє собою симетричну пасивну оптичну мережу доступу з пропускною здатністю 10 Гбіт/с у кожному напрямку, що означає однакову швидкість для низхідного та висхідного потоків. Ця технологія також підтримує використання кількох довжин хвиль, що підвищує загальну пропускну здатність і забезпечує більшу гнучкість мережі.

У таблиці 2.2 наведено довжини хвиль та реальні швидкості завантаження й скачування для чотирьох основних стандартів сімейства PON: EPON (Ethernet PON), GPON (Gigabit PON), XG-PON (10 Gigabit PON) та XGS-PON (симетричний XG-PON). Протягом еволюції цих стандартів зберігається вимога забезпечення сумісності з попередніми версіями, при цьому використовуються

вільні ділянки спектра, тобто довжини хвиль, які не були задіяні в попередніх стандартах.

Таблиця 2.2 – Стандартизовані довжини хвиль та швидкості потоків

	EPON	GPON	XG-PON	XGS-PON
Висхідний потік, нм	1260-1360	1260-1360	1260-1280	1260-1280
Низхідний потік, нм	1480-1500	1480-1500	1575-1580	1575-1580
Завантажити, Гбіт/с	1,25	1,25	2,5/10	10
Скачати, Гбіт/с	1,25	2,5	10	10

Як видно з таблиці 2.2, низхідні канали всіх розглянутих стандартів мають спільний діапазон довжин хвиль (від 1260 до 1280 нм). Це зумовлено тим, що GPON не зміг використати цю смугу частот, хоча й зарезервував її. Тому в XG-PON та XGS-PON є можливість ефективно використовувати цей не задіяний діапазон.

Хоча фізичні параметри оптоволоконна та форматування даних у XGS-PON залишилися незмінними порівняно з початковим стандартом GPON, у ньому використовуються інші довжини хвиль. Для низхідної передачі застосовується довжина хвилі 1577 нм, а для висхідної — 1270 нм. Це пояснюється необхідністю забезпечення співіснування кількох служб PON в одній мережі, що дає змогу безперервно модернізувати або мігрувати сервіси, а також дозволяє різним постачальникам послуг використовувати ту саму мережу або надавати різний рівень обслуговування (наприклад, для бізнес-клієнтів і домогосподарств). Довжини хвиль для XGS-PON відрізняються від інших стандартів, таких як GPON і NG-PON2, хоча загальний діапазон передачі в PON (від 1260 до 1650 нм) дає змогу одночасно використовувати стандарти G-PON, XGS-PON і NG-PON2 в одній оптоволоконній мережі. Оскільки XGS-PON є розвитком стандарту XG-PON і надає симетричну передачу, це єдиний випадок, коли обидва стандарти використовують однакові довжини хвиль для передачі

від і до абонентського пристрою. Наразі більшість операторів, які планують впровадження послуг на швидкості 10 Гбіт/с, вибирають XGS-PON.

Стандарти XG-PON і XGS-PON належать до серії GPON, і з технічної точки зору XGS-PON є еволюцією XG-PON, як показано на рисунку 2.3.

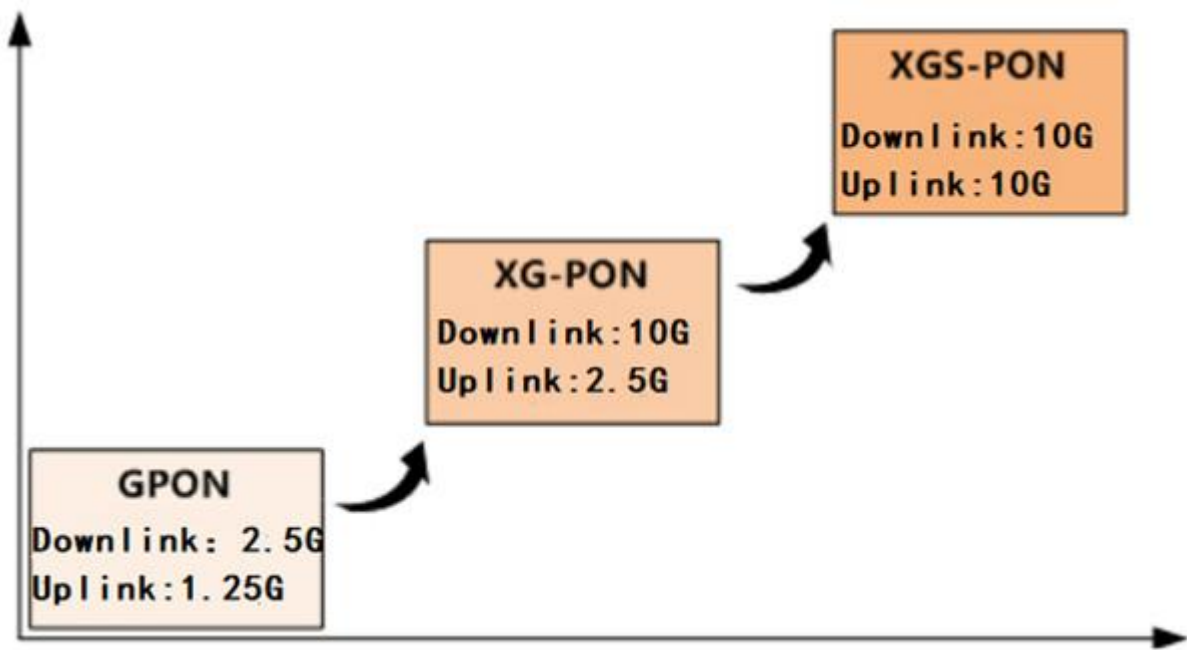


Рисунок 2.3 – Еволюція стандарту GPON

XG-PON і XGS-PON обидва належать до технологій 10G PON, але мають суттєві відмінності: XG-PON є асиметричним PON, де швидкість висхідного потоку становить 2,5 Гбіт/с, а низхідного — 10 Гбіт/с, тоді як XGS-PON є симетричним PON, що забезпечує рівну швидкість для обох потоків — 10 Гбіт/с для висхідного і 10 Гбіт/с для низхідного.

На сучасному етапі основними стандартами PON є GPON і XG-PON, які є асиметричними. Оскільки зазвичай трафік між користувачами вгору і вниз є асиметричним, наприклад, у міських мережах, де трафік висхідної лінії OLT становить лише 22% від низхідного, асиметрична архітектура PON в основному відповідає вимогам користувачів. Крім того, низька швидкість висхідного потоку в асиметричних PON дозволяє зменшити вартість компонентів, таких як лазери в ONU, що робить обладнання дешевшим.

Тепер розглянемо детальніше технологію XGS-PON. Для зручності основні характеристики зазначених стандартів наведені в таблиці 2.3 (рисунок 2.3).

Таблиця 2.3 – Основні характеристики стандартів

Назва технології		GPON	XG-PON	XGS-PON
Технічні стандарти		G.984	G.987	G.9807.1
Рік публікації		2003	2009	2016
Швидкість лінії, Мбіт/с	Downlink	2448	9953	9953
	Uplink	1244	2448	9953
Максимальний коефіцієнт розподілу		128	256	256
Максимальна дальність передачі, км		20	40	40
Доступна пропускна здатність, Мбіт/с	Downlink	2200	8500	8500
	Uplink	1800	2000	8500
Робоча довжина хвилі, нм	Downlink	1490	1577	WDM
	Uplink	1310	1270	

Низхідна лінія XGS-PON використовує широкомовний метод, а висхідна - метод TDMA.

Оскільки довжина хвилі та швидкість низхідного потоку для XGS-PON і XG-PON є однаковими, низхідна лінія зв'язку XGS-PON не розрізняє ONU для XGS-PON та XG-PON. Оптичний розгалужувач передає оптичний сигнал до кожного ONU (як XG-PON, так і XGS-PON) через один канал ODN. Кожен ONU самостійно визначає, який сигнал приймати, а який ігнорувати. Рисунок 2.4 ілюструє процес передачі низхідного потоку при наявності ONU для XG-PON та XGS-PON.

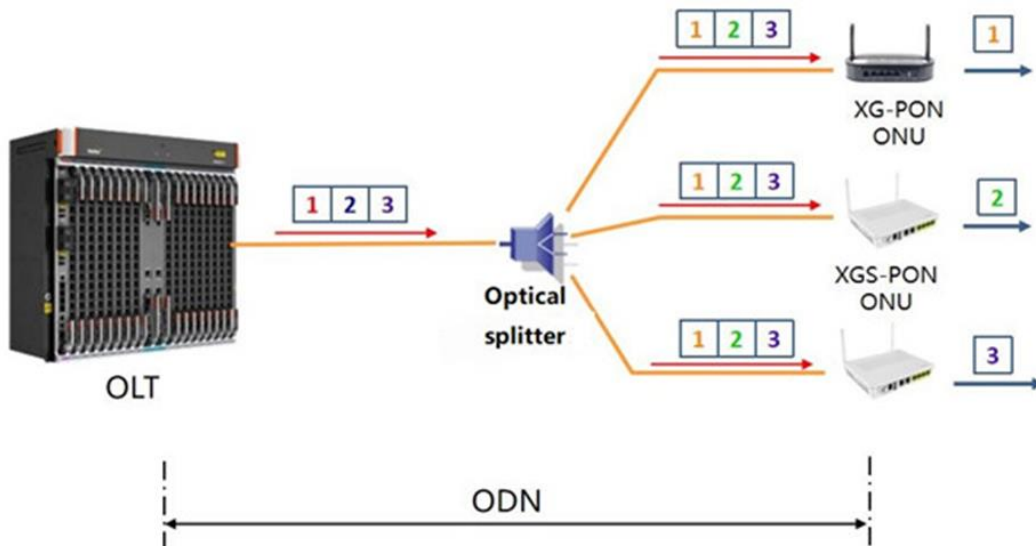


Рисунок 2.4 – Технологія передачі низхідного потоку
при наявності XG-PON ONU та XGS-PON ONU

Висхідний потік у XGS-PON передає дані відповідно до часових інтервалів, причому ONU відправляє інформацію в межах виділеного йому інтервалу, що ліцензований OLT. OLT управляє розподілом часових інтервалів з урахуванням вимог до різних типів трафіку та типів ONU. Часові інтервали динамічно розподіляються завдяки використанню технології TDM. Як відомо, швидкість передачі даних становить 2,5 Гбіт/с для часових інтервалів, призначених для XG-PON ONU, і 10 Гбіт/с для інтервалів, виділених для XGS-PON ONU. Технологія передачі висхідного потоку зображена на рисунку 2.5.

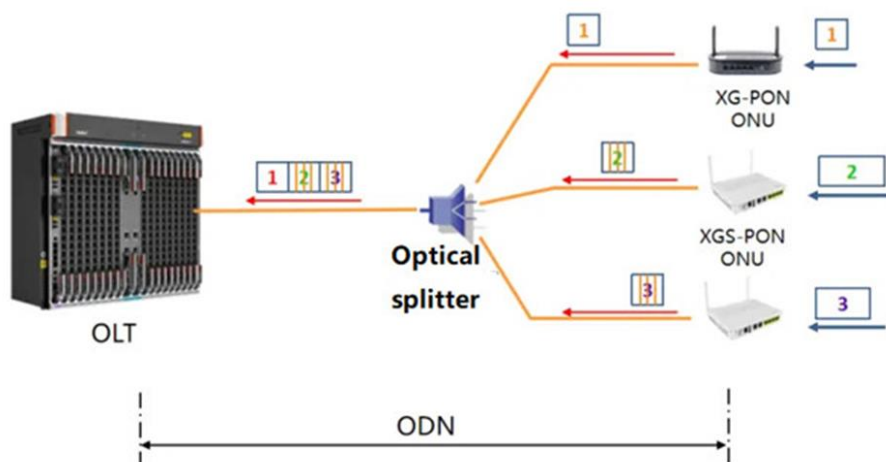


Рисунок 2.5 – Технологія передачі висхідного потоку
при наявності XG-PON ONU та XGS-PON ONU

У реальному використанні технології PON можливе одночасне існування абонентських вузлів різних стандартів, таких як GPON, XG-PON і XGS-PON. У таких випадках структура мережі доповнюється додатковим модулем. Оскільки довжини хвиль для висхідного та низхідного потоку у XGS-PON відрізняються від GPON, застосовується комбінований оптичний модуль XGS-PON, який дозволяє спільно використовувати ODN з GPON. Комбінований модуль поєднує три основні компоненти: оптичний модуль GPON, оптичний модуль XGS-PON і комбайнер WDM. Структура взаємодії в такій мережі з використанням комбінованого модуля представлена на рисунку 2.6.

У висхідному напрямку, після того як оптичний сигнал потрапляє в комбінований порт XGS-PON, WDM фільтрує сигнали GPON і XGS-PON за довжиною хвилі, а потім передає їх через різні канали.

У низхідному напрямку сигнал з каналів GPON і XGS-PON мультиплексується через WDM, і комбінований сигнал передається до ONU через ODN. Оскільки довжини хвиль різні, кожен тип ONU вибирає відповідну довжину хвилі для прийому сигналу за допомогою вбудованого фільтра.

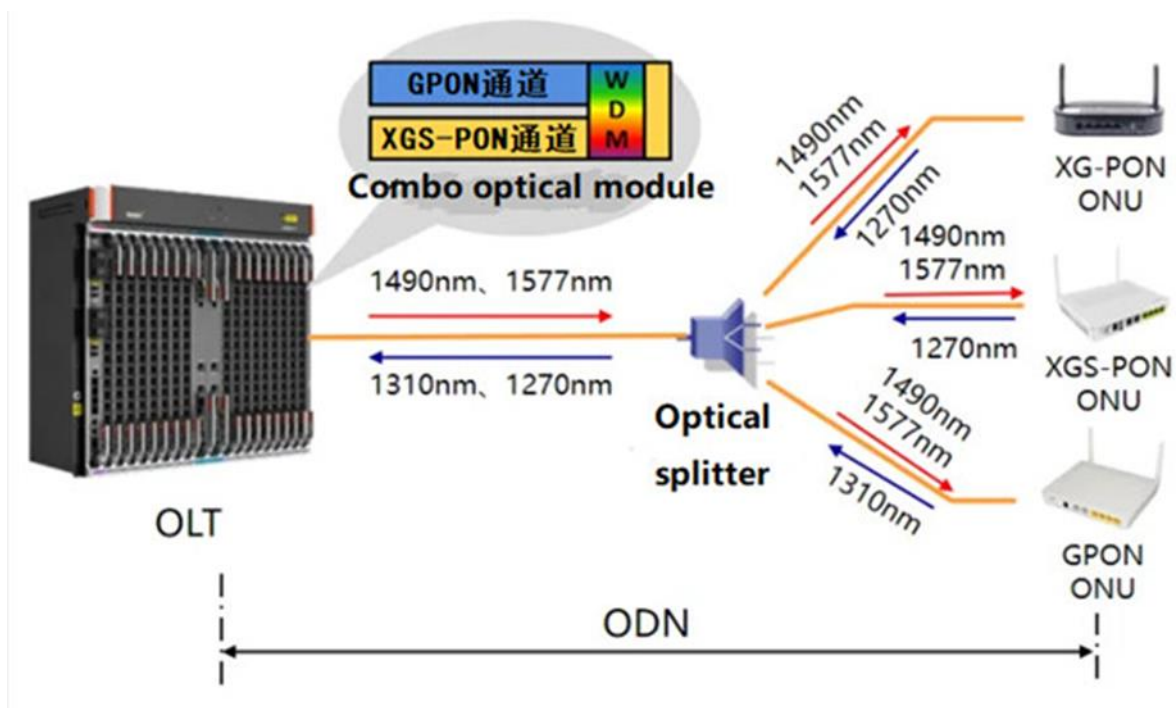


Рисунок 2.6 - Структура взаємодії мережі при використанні комбінованого оптичного модуля

Оскільки XGS-PON забезпечує сумісність з XG-PON, введення комбінованого модуля Combo XGS-PON дозволяє підтримувати змішаний доступ для стандартів GPON, XG-PON та XGS-PON. Оптичний модуль Combo XGS-PON називається трирежимним комбінованим модулем, оскільки підтримує три різні режими роботи, а комбінований модуль XG-PON — дворежимним, оскільки він лише підтримує змішаний доступ між GPON та XG-PON.

Одночасна передача даних в висхідному та низхідному напрямках по одному оптоволокну досягається за допомогою технології спектрального ущільнення каналів (WDM). Ця технологія дозволяє передавати дані в XGS-PON на різних довжинах хвиль для висхідного та низхідного потоків.

Тепер розглянемо стандарт NG-PON2. Система GPON може бути оновлена до NG-PON2 — пасивної оптичної мережі наступного покоління з пропускною здатністю 40 Гбіт/с. Залежно від потреб у розвитку послуг та мереж, цей перехід може обходити фазу XG-PON і безпосередньо оновлювати GPON до NG-PON2. NG-PON2 надає постачальникам послуг значні переваги порівняно з іншими технологіями 10G PON, такими як XG-PON1 та XGS-PON. Ці останні є одноканальними системами, які ділять доступну смугу пропускання залежно від коефіцієнта поділу. Зі своєї сторони, NG-PON2 — це багатоканальна система, яка дозволяє збільшити пропускну здатність оптоволокну в чотири рази, а також завдяки підтримці налаштовуваних оптичних мереж (ONU) забезпечує безпрецедентні переваги як для операторів, так і для користувачів. Серед цих переваг — підвищена продуктивність, краща доступність послуг, гнучкість в оплаті за мірою розширення послуг, захисна комутація по довжині хвилі, плавне оновлення програмного та апаратного забезпечення в центральному офісі та можливості енергозбереження. Завдяки гнучкості та підвищеній продуктивності NG-PON2 все більше постачальників послуг впроваджують цю технологію, що в перспективі сприятиме зниженню вартості оптичного обладнання.

Можливості NG-PON2.

- Забезпечує гнучкість смуги пропускання.
- Підтримує модель «оплата у міру зростання послуг», яка дозволяє постачальникам послуг адаптивно розподіляти довжин хвиль за необхідності.
- Підтримує оновлення сервісу з використанням керованої оптики.
- Підтримує технологію до 40/40 Гбіт/с (80/80 Гбіт/с у майбутньому).
- Підтримує «розподіл волокон», що дозволяє постачальникам послуг виділяти потрібні довжини хвиль.
- Надає конвергентну мережу, яка забезпечує підтримку будь-яких послуг, включаючи: бізнес-послуги, транспортні та побутові послуги.

Враховуючи гостру конкуренцію за абонентів, постачальники послуг повинні швидко адаптовуватися, надавати нові інноваційні послуги. Крім того, для задоволення зростаючих потреб у пропускній спроможності мережі постачальники послуг зобов'язані впроваджувати нові технології, такі як NG-PON2, та шукати нові, інноваційні способи забезпечення швидкої та гнучкої роботи при одночасному зниженні витрат.

NG-PON2 - огляд технології. Стандарт NG-PON2 об'єднує мережі з кількома службами в один ODN. Це суттєво знижує сукупну вартість послуг. Важливо також, що є можливість впровадження нової ефективної архітектури, адаптованої до нових потреб абонентів. Рисунок 2.7 ілюструє основні структурні вузли NG-PON2.

Optical Line Terminals (OLT) – Лінійні карти OLT підтримують сумісні плани довжин хвиль, надаючи приймачі та передавачі, налаштовані на відповідні довжини хвиль ($\lambda_1 \dots \lambda_4$).

Optical Networking Units (ONU) – ONU оснащені лазерами, фільтрами та приймачами, які можуть перебудовуватись для підтримки сумісних планів довжин хвиль, що забезпечує їх гнучкість і мобільність.

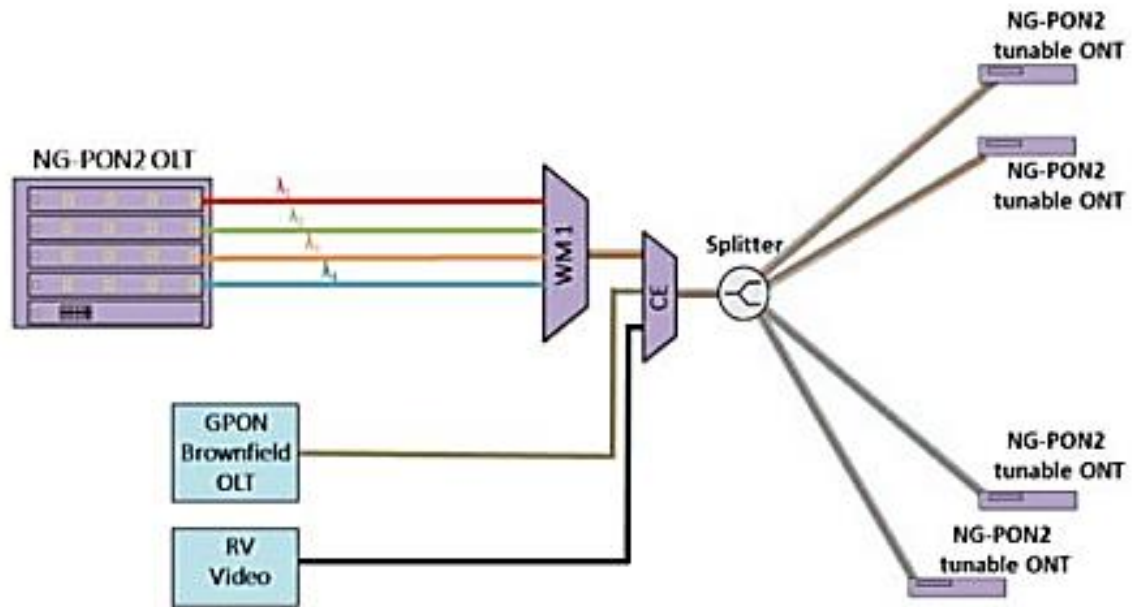


Рисунок 2.7 - Організація каналу NG-PON2

Wavelength Multiplexer (WM1) – Хвильовий мультиплексор (MUX) з пасивним розподілом довжин хвиль, який поєднує 4 довжини хвиль NG-PON2 в одному волокні, з можливістю розширення до 8 довжин хвиль у майбутньому.

Co-existence Element (CE) – Пристрій MUX з пасивним розподілом довжин хвиль, що дозволяє об'єднувати різні технології доступу в одному волокні.

NG-PON2 використовує технологію мультиплексування з поділом за часом та довжиною хвилі (TWDM) і підтримує принаймні одну довжину хвилі, з можливістю розширення до 4 ($\lambda_1 \dots \lambda_4$) або до 8 довжин хвиль у майбутньому в рамках моделі оплати за зростанням на кожному волокні. Це робить NG-PON2 першим у галузі стандартом доступу з кількома довжинами хвиль. Кожна довжина хвилі може забезпечувати симетричну швидкість 10 Гбіт/с для як висхідного, так і низхідного потоку, що дозволяє досягти загальної пропускної здатності в 40 Гбіт/с для одного оптоволоконного з'єднання. У разі використання максимальних 8 довжин хвиль, NG-PON2 може забезпечувати пропускну здатність до 80 Гбіт/с.

Переваги технології NG-PON2:

- Забезпечує симетричну швидкість 10 Гбіт/с для однієї довжини хвилі та до 8 довжин хвиль в ODN.
- Підтримує чотири довжини хвилі в першій версії стандарту з можливістю переходу на 8 довжин хвиль.
- Сумісний з технологіями GPON, XGS-PON та XG-PON1.
- Підтримує налаштовувану оптику, що забезпечує гнучкість по довжині хвилі.
- Дає можливість підлаштовувати пропускну здатність на вимогу.

Для NG-PON2 характерна мобільність по довжині хвилі, що дозволяє ONU «бачити» всі довжини хвиль в ODN і надає можливість використовувати налаштовувану оптику (ONT), яка може працювати з будь-якою доступною довжиною хвилі. Мобільність по довжині хвилі дозволяє постачальникам послуг створювати правила, що визначають, як ONT можуть переміщатися між різними кінцевими пристроями каналу для обслуговування PON.

Зв'язування каналів на основі кількох довжин хвиль, підтримуваних ODN, дає можливість збільшити пропускну здатність ONU. Наприклад, якщо для бізнес-клієнта потрібна реальна пропускна здатність 10 Гбіт/с, оператор може забезпечити необхідну пропускну здатність, надаючи більше ніж одну довжину хвилі, наприклад, дві довжини хвиль для одного ONU.

2.3 Технічна підтримка якості широкосмугового доступу в PON

Найбільш характерним проявом високої якості широкосмугового доступу вважається швидкість доставки даних абоненту мережі. Цей параметр (при інших незмінних умовах) безпосередньо пов'язаний з так званою спектральною ефективністю модуляції. У цьому контексті важливу роль відіграють багатопозиційні види модуляції.

Технологія PON базується на використанні оптичного волокна і оптичних сигналів. Високі частоти оптичних сигналів та надширокі смуги пропускання

світловодів гарантують високі швидкості передачі даних і до певного моменту вважалось, що будь-які вимоги користувачів можуть бути легко виконані. Але тепер ця точка зору вже піддається сумніву. Це означає, що постає проблема нарощування швидкодії елементної бази і впровадження в нові стандарти ефективних модуляційних схем. У першу чергу мова йде про квадратурну амплітудну модуляцію, яка забезпечує кратне збільшення бітової швидкості.

Так, технологія QAM (Quadrature Amplitude Modulation) дійсно застосовується в сучасних пасивних оптичних мережах (PON), хоча її впровадження є більш характерним для нових стандартів, таких як XG-PON і NG-PON2. У цих системах QAM використовується для підвищення ефективності використання спектра та досягнення високих швидкостей передачі даних, що особливо важливо для отримання багатократних значень пропускної здатності в обмеженому діапазоні частот.

QAM є технологією модуляції, яка дозволяє передавати більше біт на кожен одиницю часу, комбінуючи амплітудну модуляцію (AM) та фазову модуляцію (PM). Це дозволяє збільшити спектральну ефективність і забезпечує більшу пропускну здатність без необхідності збільшувати фізичну ширину смуги пропускання каналу.

XG-PON і NG-PON2 є двома сучасними стандартами, які активно використовують технології модуляції для досягнення високих швидкостей. Вони можуть використовувати QAM для модуляції в прийомі та передачі даних, що дозволяє збільшити ефективність і пропускну здатність мережі. Для NG-PON2 зазвичай використовують 16-QAM або навіть 64-QAM, що дозволяє досягти швидкості до 40 Гбіт/с на канал. 16-QAM та 64-QAM є популярними варіантами в цих мережах, де кожен символ несе в собі більше інформації завдяки поєднанню амплітудної та фазової модуляції.

Зазначимо переваги використання QAM в PON:

- Висока спектральна ефективність: Оскільки в QAM один символ несе більше біт (наприклад, 16-QAM передає 4 біти на символ, а 64-QAM — 6 біт на

символ), це дозволяє збільшити пропускну здатність каналу при тому ж фізичному обсязі спектру.

- Збільшення швидкості передачі даних: Завдяки використанню високих порядків модуляції (наприклад, 64-QAM або 256-QAM), можна досягти значних збільшень швидкості, що є важливим для задоволення зростаючого попиту на швидкісні інтернет-з'єднання.

- Зниження витрат на інфраструктуру: Оскільки можна передавати більше біт на одиницю часу, це знижує потребу в додаткових каналах чи волокнах для забезпечення більшої пропускну здатності.

Існують певні застереження щодо використання QAM в PON. Хоча QAM має значні переваги в термінах швидкості та спектральної ефективності, є кілька обмежень, які необхідно враховувати при її використанні в PON:

- Стійкість до шуму та втрат сигналу: Вищі порядки модуляції, такі як 64-QAM або 256-QAM, дуже чутливі до шуму, спотворень та втрат сигналу. Це обмежує їх ефективність на довгих відстанях або в умовах, де є велике збурення.

- Вимоги до якості волокна та обладнання: Для надійної роботи з високими порядками QAM необхідні високоякісні оптичні волокна та дуже чутливе апаратне обладнання, яке може коректно обробляти такі сигнали, що додає витрат на інфраструктуру.

- Енерговитратність і складність обробки сигналів: Високі порядки модуляції потребують складнішої обробки сигналів, що може збільшити вимоги до енергії та потужності обчислювальних пристроїв.

У звичайних GPON-системах QAM не використовується через обмежену пропускну здатність і простоту модуляції. Тут використовуються методи, які менш вимогливі до якісного сигналу, такі як NRZ (Non-Return-to-Zero), що добре підходять для більш простих і менш вимогливих мереж.

Стандарти NG-PON2 та XG-PON (XGS-PON) активно досліджують і впроваджують технології, які включають QAM, щоб забезпечити пропускну здатність до 40 Гбіт/с і вище на канали. Це важливо для задоволення високих

вимог до швидкості передачі даних у сучасних мережах. Однак для існуючих GPON і EPON стандартів, де максимальні швидкості передавання даних зазвичай складають 2,5 Гбіт/с (GPON) або 10 Гбіт/с (EPON), використання високих порядків QAM не є необхідним і не підтримується.

Отже, технологія QAM застосовується в PON, але в основному в нових високошвидкісних стандартах, таких як XG-PON і NG-PON2, для досягнення більшої пропускної здатності та ефективності використання спектра. Вона дозволяє значно збільшити швидкість передачі даних, але має свої обмеження щодо стійкості до шуму та вимог до інфраструктури. Для більш старих і менш швидкісних стандартів (як GPON) її використання не є необхідним або практичним.

2.3.1 Аналіз характеристик стандарту XG-PON (XGS-PON)

XG-PON (XGS-PON) — це один із стандартів оптичних мереж пасивного типу (PON), який забезпечує високу швидкість передачі даних для широкосмугових з'єднань у доступних мережах. Він є вдосконаленням попереднього стандарту GPON (Gigabit Passive Optical Network), і є частиною сімейства XG-PON, що включає кілька варіантів, зокрема XG-PON і XGS-PON.

Основні характеристики стандарту XG-PON (XGS-PON):

1. Швидкість передачі:

- XG-PON підтримує швидкість до 10 Гбіт/с низхідного потоку (downstream) і до 2,5 Гбіт/с висхідного потоку (upstream).

- XGS-PON розширює можливості XG-PON, забезпечуючи симетричні швидкості до 10 Гбіт/с як для низхідного, так і для висхідного потоків. Це дозволяє надавати високошвидкісні послуги з рівними швидкостями для завантаження та вивантаження даних, що є важливим для сучасних двосторонніх застосунків, таких як відеоконференції, онлайн-ігри та хмарні сервіси.

2. Механізм розподілу ресурсу:

- XG-PON і XGS-PON використовують техніку пасивного оптичного розподілу (PON), де один оптичний передавач (OLT — Optical Line Terminal) обслуговує кілька абонентських пристроїв (ONT — Optical Network Terminals) через пасивні оптичні спліттери.

- У стандарті XG-PON зазвичай підтримується сплітинг 1:32 (один передавач на 32 абоненти), але можлива й більша кількість абонентів в залежності від конфігурації мережі.

3. Модуляційні схеми:

- Для підвищення ефективності передачі та зменшення помилок при передачі даних XG-PON і XGS-PON використовують високоефективні методи модуляції. Стандарт XG-PON, зокрема, використовує лінійний код NRZ (Non-Return to Zero) для передачі даних.

4. Сумісність з GPON:

- XGS-PON є зворотно сумісним з GPON. Це означає, що оператори можуть оновлювати свої мережі до XGS-PON, не замінюючи існуючі пристрої, зокрема ONT. Це дозволяє забезпечити плавний перехід між стандартами та зменшити витрати на оновлення інфраструктури.

5. Масштабованість:

- XGS-PON підтримує великий обсяг даних, що дозволяє легко масштабувати мережу для обслуговування більшої кількості користувачів і підвищити пропускну здатність для бізнес- і побутових застосунків.

- Завдяки високій швидкості передачі та ефективному розподілу ресурсів, XGS-PON є підходящим для надання послуг в густонаселених районах, а також для підтримки інтенсивних відео- та геймерських сервісів.

6. Сумісність із існуючими мережами:

- Однією з ключових переваг XG-PON є сумісність з іншими технологіями оптичних мереж, такими як GPON і EPON, що дозволяє операторам поетапно переходити на нові швидкісні стандарти без значних витрат на модернізацію вже існуючих мереж.

7. Інтерфейси та архітектура:

- XGS-PON підтримує архітектуру E-PON (Ethernet Passive Optical Network), що дозволяє інтегрувати стандарт XGS-PON у більші Ethernet-мережі, що надає оператору більшу гнучкість та сумісність з іншими технологіями.

8. Використання:

- XG-PON і XGS-PON призначені для забезпечення швидкісного доступу в інтернет, IPTV, відеоконференцій, VoIP, а також для підприємств, які потребують стабільної та високошвидкісної передачі даних. Це також є гарним рішенням для програм хмарних обчислень, передавання великих обсягів даних і надання телекомунікаційних послуг у густонаселених районах або містах.

9. Діапазон хвиль:

- XG-PON і XGS-PON використовують два діапазони довжин хвиль для передавання: один для downstream (від передавача до абонента) і один для upstream (від абонента до передавача). Зазвичай це 1264-1337 нм для downstream і 1270-1335 нм для upstream.

Переваги XG-PON (XGS-PON):

- Висока швидкість передачі даних — до 10 Гбіт/с на обидві сторони (для XGS-PON).
- Масштабованість і гнучкість — підтримка великої кількості абонентів, сумісність з іншими технологіями.
- Сумісність з існуючими мережами GPON — можливість оновлення без заміни всієї інфраструктури.
- Висока ефективність — зниження витрат на інфраструктуру завдяки використанню оптичного спліттера.

До недоліків відносять вартість обладнання, яке повинне підтримувати стандарти XGS-PON і, очевидно, відрізнятися високою швидкодією.

2.3.2 Аналіз характеристик стандарту NG-PON2

NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2) — це сучасний стандарт оптичних пасивних мереж, розроблений для підтримки значно вищих

швидкостей передачі даних і більш ефективної масштабованості порівняно з попередніми стандартами PON, такими як GPON, XG-PON та XGS-PON. Стандарт NG-PON2 є частиною розвитку технологій для задоволення зростаючого попиту на пропускну здатність в оптичних мережах доступу, включаючи розширені можливості для підприємств і споживачів.

Основні характеристики стандарту NG-PON2:

1. Швидкість передачі:

- NG-PON2 забезпечує двосторонню швидкість до 40 Гбіт/с (для downstream і upstream) в одиничній оптичній лінії.
- Зазвичай, у реальних умовах мережі реалізується передача в діапазоні від 10 до 40 Гбіт/с, залежно від специфікацій і конфігурації мережі.

2. Механізм розподілу:

- NG-PON2 використовує технологію WDM (Wavelength Division Multiplexing), що дозволяє використовувати кілька різних довжин хвиль для одночасної передачі даних по одній оптичній лінії.
- Це дозволяє одночасно передавати дані для кількох абонентів, збільшуючи пропускну здатність мережі та її ефективність.
- У NG-PON2 підтримується 4 або більше довжин хвиль для передачі, що дає змогу отримати велику пропускну здатність порівняно з традиційними PON-системами, які зазвичай використовують одну довжину хвилі для downstream і одну для upstream.

3. Модуляційні схеми:

- Для підвищення пропускну здатності і зменшення помилок передачі в NG-PON2 використовуються високоефективні методи модуляції, зокрема 256-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), яка дозволяє збільшити кількість біт на символ, що підвищує ефективність використання спектра.

4. Сумісність з попередніми стандартами PON:

- NG-PON2 зберігає зворотну сумісність з попередніми стандартами PON, такими як GPON і XG-PON, що дозволяє операторам поступово переходити на нові технології без необхідності повної заміни всієї інфраструктури.

- Завдяки підтримці множинних довжин хвиль (WDM), нові системи можуть одночасно працювати з існуючими мережами, забезпечуючи плавний перехід і знижуючи витрати на модернізацію.

5. Сумісність з іншими технологіями:

- NG-PON2 використовує архітектуру, яка підтримує стандарт Ethernet і інші телекомунікаційні протоколи, що дозволяє інтегрувати цей стандарт у більші та складніші мережі.

6. Інтерфейси та архітектура:

- NG-PON2 підтримує архітектуру, що забезпечує більшу гнучкість і масштабованість у порівнянні з попередніми стандартами.

- Використовуються гнучкі оптичні мережі, які дозволяють оператору ефективно керувати спектром і ресурсами мережі в реальному часі.

7. Застосування:

- NG-PON2 здатен задовольняти потреби різних користувачів, включаючи домогосподарства, бізнеси та великі підприємства, а також підтримувати вимоги до високошвидкісних послуг, таких як високоякісне відео (4K/8K), хмарні сервіси, великого обсягу дані, а також інтернет речей (IoT) і індустріальний інтернет.

- Цей стандарт також є ідеальним для створення складних і масштабованих мереж з великою кількістю абонентів, як у містах, так і в інфраструктурах великих підприємств.

8. Масштабованість і гнучкість:

- Завдяки підтримці WDM та можливості додавання нових довжин хвиль для розширення пропускної здатності, NG-PON2 дозволяє легко масштабувати мережу, додаючи нові канали без значних змін у фізичній інфраструктурі.

- Це дозволяє операторам задовольняти зростаючий попит на пропускну здатність без великих капітальних витрат на модернізацію мережі.

9. Підвищена ефективність використання спектра:

- Завдяки використанню мультихвильових технологій (WDM), NG-PON2 значно підвищує ефективність використання доступного спектра в порівнянні з

попередніми технологіями, що дозволяє зменшити втрати і підвищити пропускну здатність мережі.

Переваги NG-PON2:

- Висока швидкість передачі — можливість підтримки швидкостей до 40 Гбіт/с.
- Сумісність з попередніми стандартами (GPON, XG-PON), що полегшує модернізацію мереж.
- Масштабованість — можливість додавати нові довжини хвиль для збільшення пропускну здатності.
- Ефективне використання спектра за допомогою WDM.
- Підвищена пропускна здатність для підтримки вимог до відео високої чіткості, хмарних сервісів та інтернету речей.
- Гнучкість і надійність у використанні для великих мереж та різноманітних застосувань.

У таблиці 2.4 наводяться (як підсумок, для порівняння) основні характеристики стандартів.

Таблиця 2.4 – Основні характеристики стандартів PON

Технологія PON	BPON	EPON	GPON	XG-PON	NG-PON2
Максимальна кількість ONU на волокно	32	16	64; 128	32; 64 (128; 256)	≥ 256
Відстань, км	20	30(20)	20	20(40; 60)	≥ 60
Швидкість $\rightarrow/\leftarrow$, Гбіт/с	0,155/0,155 0,622/0,155 0,622/0,622	1/1	2,4/1,2 2,4/2,4	10/10; 2,5	$\frac{4}{\div 8}$ $\times (2,5; \frac{10}{2,5}; 10)$
Хвилі $\rightarrow/\leftarrow$, нм	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1310/1310)	1550/1310 (1480/1310)	1260-1280 1260-2800	DWDM

До недоліків відносять високу вартість впровадження, незважаючи на великі можливості для масштабування, та складність у впровадженні для операторів, які переходять від більш старих технологій (наприклад, GPON), через необхідність оновлення інфраструктури.

2.4 Висновки до розділу

Розглянуто схеми співіснування основних стандартів технології PON та показано шляхи удосконалення та нарощування архітектури існуючих мереж при впровадженні нових стандартів. Наведено особливості новітніх стандартів XG-PON, XGS-PON та NG-PON2 та їх основні технічні характеристики.

Показано, що XG-PON та XGS-PON є потужними і перспективними стандартами для створення високошвидкісних оптичних мереж доступу. Вони забезпечують гнучкість, високу пропускну здатність і сумісність з попередніми поколіннями технологій PON, що робить їх ідеальним рішенням для широкомасштабних і швидко зростаючих телекомунікаційних мереж, особливо в умовах постійно зростаючого попиту на швидкість і обсяг передаваних даних.

Також NG-PON2 є потужним і перспективним стандартом для створення майбутніх оптичних мереж доступу. Завдяки високій швидкості передачі, підтримці WDM і високій масштабованості, NG-PON2 є ідеальним рішенням для забезпечення високошвидкісних телекомунікаційних послуг у густонаселених районах, великих підприємствах і для підтримки новітніх технологій, таких як відео 4K/8K, хмарні сервіси та інтернет речей. Цей стандарт відкриває великі можливості для розвитку інфраструктури майбутнього в умовах постійного зростання попиту на широку смугу пропускання та надійність мереж.

Таким чином, обґрунтована можливість досягнення високої якості доступу в пасивних оптичних мережах.

3 ВПЛИВ АРХІТЕКТУРИ WDM-PON НА ЯКІСТЬ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ

3.1 Співіснування WDM-PON та TDM-PON

Технологія хвильового мультиплексування відіграє ключову роль у підвищенні якості широкосмугового доступу, що підтверджується аналізом новітніх стандартів, описаним у попередньому розділі, де ця технологія застосовується. З практичного боку, важливим є питання ефективного функціонування мереж PON, коли поєднуються технології WDM-PON та TDM-PON.

На рис. 3.1 наведено концепцію системи, що демонструє перехід від TDM-PON до WDM-PON.

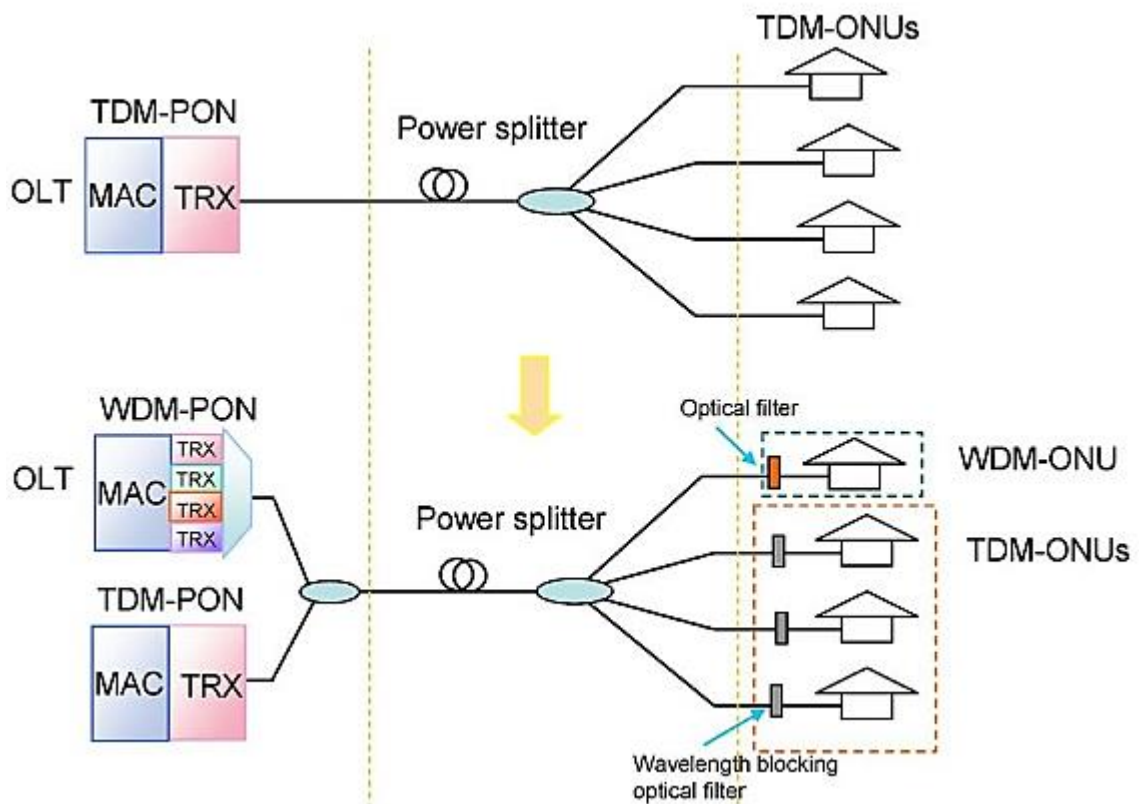


Рисунок 3.1 - Концепція переходу з TDM-PON на WDM-PON

У цій схемі OLT для WDM-PON підключається до існуючого TDM-PON через пасивний волоконний комбінатор. Нижчі довжини хвиль WDM, відмінні

від тих, що використовуються в TDM-PON, можуть бути застосовані для трансляції сигналів на різні WDM-ONU. Потім кожен WDM-ONU вибирає необхідну довжину хвилі за допомогою настроюваного фільтра або попередньо налаштованого фільтра з фіксованою довжиною хвилі. Також оптичні фільтри можуть бути заздалегідь встановлені для TDM-ONU, щоб блокувати небажані довжини хвиль, що виникають у WDM-PON. У запропонованій мережі для кожного WDM-ONU необхідний лише один оптичний фільтр, який обирає потрібну довжину хвилі та одночасно демодулює сигнал DPSK, що передається вниз. Це рішення є економічно вигідним, оскільки не потребує додаткових лазерних джерел у WDM-ONU.

Запропонована схема дозволяє здійснити міграцію з TDM-PON на WDM-PON з мінімальними додатковими витратами для існуючих користувачів TDM-PON, оскільки не потрібно змінювати існуючу волоконну інфраструктуру. Така схема також дозволяє співіснувати TDM-PON, що обслуговує користувачів із низькою швидкістю передачі даних, і WDM-PON, яке забезпечує високу швидкість передачі для користувачів, готових платити більше за ці послуги.

Щоб забезпечити масштабованість, якої не вистачає традиційним PON, було запропоновано кілька архітектур WDM-PON. Як зазначалося раніше, простим способом для збільшення пропускної здатності TDM-PON є виділення окремого каналу на кожну довжину хвилі для кожного користувача. Однак це рішення, хоч і забезпечує високу пропускну здатність, має високу вартість. Причина цього полягає в тому, що коли користувач вимикає своє з'єднання, відповідний приймач на OLT припиняє роботу і не може обслуговувати інших користувачів, що призводить до невикористаних мережевих ресурсів. У наступному розділі розглянемо деякі типові архітектури WDM-PON, які відходять від цього простого підходу з метою досягнення більш ефективних результатів.

3.2 Композитний PON (CPON)

Для вирішення проблеми масштабованості традиційних PON однією з перших пропозицій архітектури WDM-PON, заснованої на концепції AWG, було використання WDM у діапазоні 1550 нм для низхідного потоку та однієї довжини хвилі у діапазоні 1300 нм для висхідного потоку. Висхідний потік у цій архітектурі був організований на основі спільного доступу для всіх ONT за допомогою технології TDMA (множинний доступ з розподілом часу).

Початкова версія цієї архітектури передбачала використання окремих волокон для висхідного та низхідного потоків. Однак було запропоновано нове рішення — інтегрований пристрій, який здійснював маршрутизацію довжин хвиль WDM в одному вікні і об'єднання потужності, незалежної від довжини хвилі, в іншому вікні через CWDM по одному волокну. Цю архітектуру часто називають композитною PON (CPON), як показано на рис. 3.2.

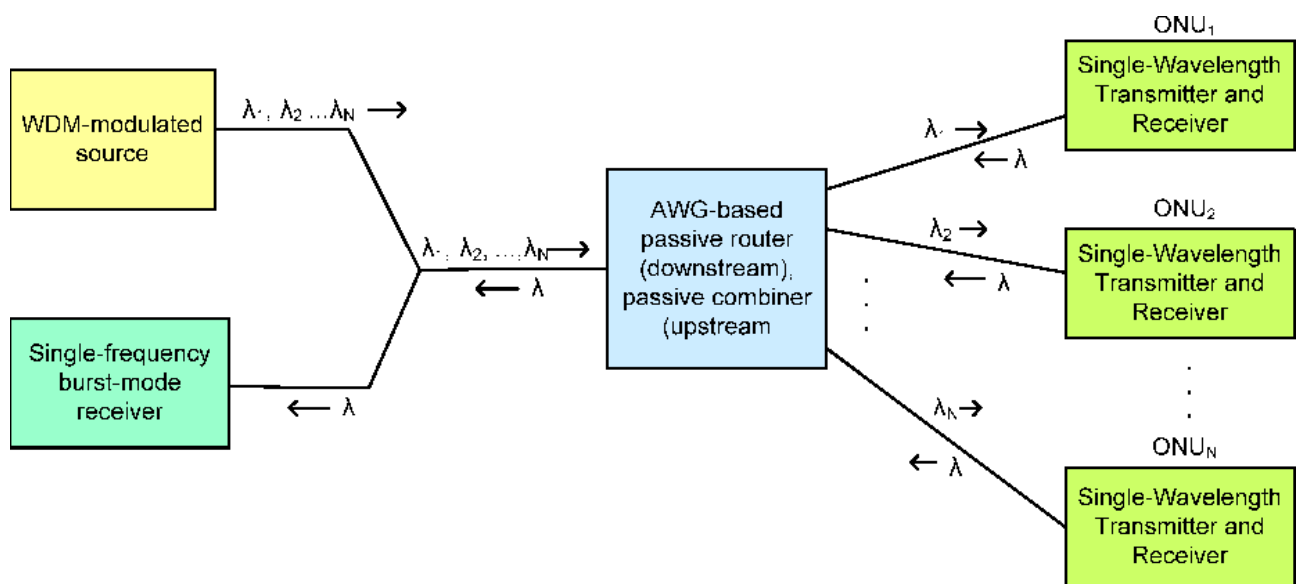


Рисунок 3.2 – Архітектура CPON

Прийом висхідного сигналу в OLT здійснюється за допомогою однохвильового приймача у пакетному режимі. Такий приймач потрібен для синхронізації з тактовими сигналами різних ONU в режимі передачі, які можуть бути на різних відстанях від OLT.

CPON уникає недоліків висхідного WDM, але обмежений тим, що одночастотний лазер або лазерний діод з розподіленим зворотним зв'язком (LD) в ONU, може бути економічно невигідним.

3.3 Локальна мережа маршрутизатора доступу (LARNET)

Архітектура LARNET (локальна мережа маршрутизатора доступу) намагається подолати обмеження CPON, використовуючи джерело з широким спектром в ONU, наприклад, недорогий світлодіод (LED). Світлодіод випромінює широкий спектр хвиль, який потім розділяється за допомогою AWG (оптичного розподільного пристрою), що виконує роль маршрутизатора, на різні оптичні діапазони для висхідного потоку. Такий світлодіод, на відміну від лазера DFB, який випромінює тільки одну довжину хвилі, зосереджує спектр навколо певної довжини хвилі.

Основною перевагою використання світлодіода є те, що всі ONU можуть використовувати однаковий пристрій, що спрощує мережеву інфраструктуру в порівнянні з використанням різних лазерів DFB для кожного ONU.

Архітектура LARNET представлена на рис. 3.3.

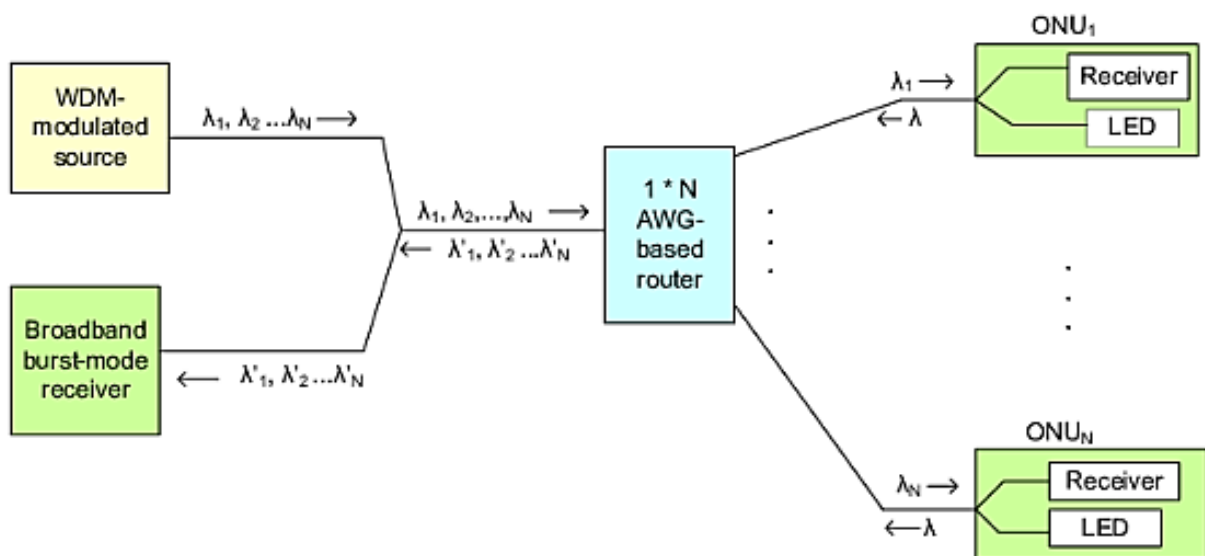


Рисунок 3.3 - Архітектура LARNET

У різні порти маршрутизатора AWG подаються хвилі з одного джерела для кожного ONU в межах широкого спектра. В залежності від порту вхідного сигналу, компоненти довжини хвилі будуть відрізнятися. Таким чином, на вихідному порті маршрутизатора спостерігається кілька компонентів довжини хвилі, кожна з яких відповідає вхідному сигналу від конкретного ONU. Нижній сигнал з кількома компонентами довжини хвилі в центральному офісі (CO) генерується багаточастотним лазером (MFL), який підключений до передавального волокна через мультиплексор для діапазонів 1,3 або 1,5 мкм.

Для прийому сигналу в CO використовується широкосмуговий приймач (на відміну від приймача для пакетного режиму, який працює з однією довжиною хвилі в CPON), здатний приймати будь-який спектральний компонент, що випромінюється світлодіодом. Таким чином, OLT у CO може приймати сигнали на будь-якій довжині хвилі від кожного ONU. Оскільки в OLT використовується лише один приймач, вихідний канал розподіляється між ONU за допомогою схеми, наприклад, TDMA.

Світлодіоди з широким спектром значно дешевші за лазери DFB, що допомагає знизити вартість ONU. Однак основним обмеженням цієї архітектури є те, що спектральне розрізання джерела широкого спектру AWG може призвести до значних втрат потужності. Тому в архітектурі LARNET відстань між OLT і ONU повинна бути зменшена.

3.4 PON з віддаленим опитуванням термінальної мережі (RITENET)

Архітектура RITENET (Remote Terminal Network) спрямована на усунення необхідності в передавачі в ONU, шляхом модуляції низхідного сигналу, що надходить від OLT, і його повернення в висхідний напрям. У ONU світловий сигнал ділиться на дві частини: одна з них потрапляє в приймач, а інша повертається до CO через модулятор. У OLT сигнали низхідного та висхідного потоків розділяються в часі.

Для маршрутизації довжин хвиль в RITENET використовується маршрутизатор на основі AWG $2 \times 2N$. В CO настроюваний лазер, чия довжина хвилі відповідає режимам хвильового селективного фільтра (AWG), випромінює дискретні довжини хвиль, які направляються в канали ONU. Таким чином, і висхідний, і низхідний канали спільно використовуються ONU за допомогою технологій TDMA або динамічного розподілу пропускну здатності. Як альтернатива, в деяких нових архітектурах OLT може використовувати набір передавачів і приймачів, що дозволяє уникнути необхідності обміну каналами. В такому випадку один і той самий оптичний канал використовується як для висхідного, так і для низхідного потоків, які повинні бути передані через два окремі волокна.

Архітектура RITENET зображена на рисунку 3.4.

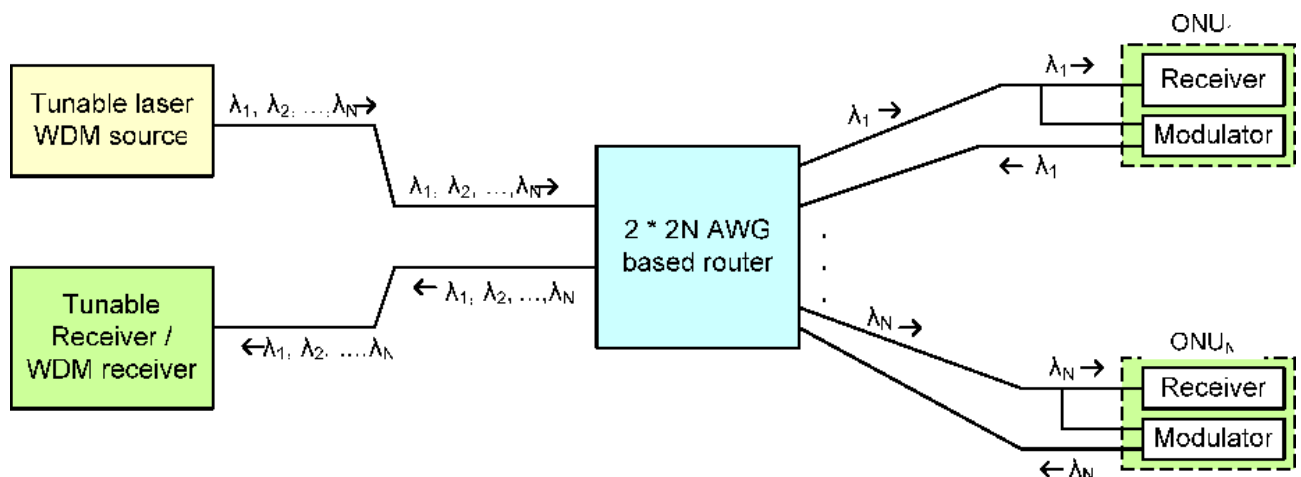


Рисунок 3.4 - Архітектура RITENET

Хоча RITENET дозволяє знизити витрати на кінцеві термінали в ONU, відстань між OLT і ONU значно зменшується, оскільки сигнал тепер повинен пройти вдвічі більшу відстань. Це призводить до того, що кількість волокон в архітектурі подвоюється, що, в свою чергу, збільшує витрати на розгортання та обслуговування. Крім того, використання настроюваного лазера або масиву передавачів і приймачів в OLT робить RITENET дорожчою архітектурою порівняно з CPON і LARNET.

Однак архітектура має й певні переваги, зокрема забезпечує симетричну пропускну здатність для висхідного та низхідного напрямків. Також, на відміну від LARNET, вихідний сигнал не піддається втратам через спектральне зрізання, що покращує якість сигналу.

3.5 Багатоступенева архітектура WDM-PON на основі AWG

Наведені вище архітектури мають два основних обмеження:

- складнощі зі збільшенням кількості ONU після розгортання мережі;
- обмежена кількість користувачів через технологічні обмеження розміру AWG.

Для вирішення цих проблем була запропонована багатоступенева архітектура WDM-PON, яка використовує періодичну маршрутизацію AWG, що дозволяє повторно використовувати одну і ту ж довжину хвилі для кількох абонентів.

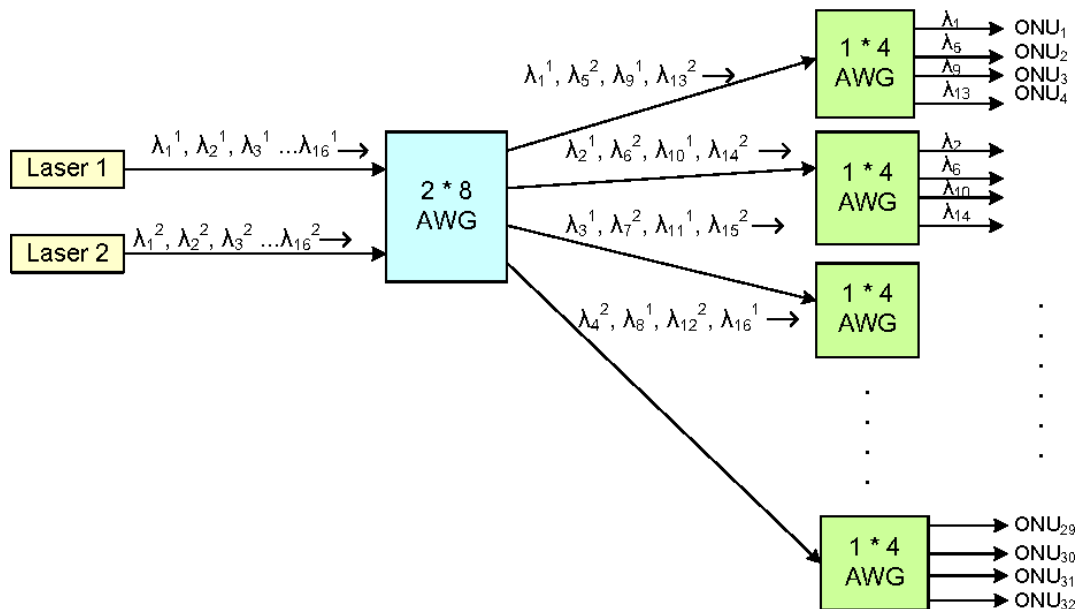


Рисунок 3.5 - Багатоступенева архітектура WDM-PON на основі AWG

Ця архітектура забезпечує масштабованість як пропускну здатності, так і кількості користувачів, додаючи нові довжини хвиль на СО або каскадуючи

кілька ступенів AWG з підвищенням їх грубості на кожному етапі. Така багатоступенева архітектура показана на рис. 3.5.

На схемі продемонстровано, як додаткові AWG можуть бути використані для масштабування мережі з 8-хвильової архітектури WDM-PON з 8 ONU до архітектури WDM-PON з 32 довжинами хвиль і 32 ONU.

Номер довжини хвилі позначає її порядковий номер, а верхній індекс вказує на джерело, наприклад, λ_1^2 позначає довжину хвилі 1 від лазера 2. Багатоступенева архітектура WDM-PON на основі AWG має кілька переваг. Застарілі ONU (ONU1-ONU8) залишаються незмінними та продовжують використовувати довжини хвиль $\lambda_1^1 - \lambda_4^1$ і $\lambda_1^2 - \lambda_4^2$. Старі 2×8-канальні AWG зберігаються, а для масштабування мережі додаються нові 1×4-канальні AWG.

3.6 Архітектура DWDM Super-PON (SPON)

PON має обмеження щодо відстані передачі та кількості вузлів, які можуть бути підтримані через обмежений бюджет потужності. Наприклад, максимальна відстань передачі для EPON становить 20 км, а максимальна кількість вузлів — 32. Мережеві оператори прагнуть розширити зону обслуговування за межі місцевих АТС, що дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати.

Архітектура super-PON (SPON) дозволяє покривати відстань понад 100 км з коефіцієнтом розподілу до 2000 за допомогою оптичних підсилювачів (OAs). Підсилювачі розташовуються в довгому фідері після першого каскаду розщеплення, що забезпечує необхідний бюджет потужності для системи. Переваги від впровадження SPON включають не лише ефективне використання ресурсів, але й консолідацію мережевих точок перемикачів. Однак SPON з однією довжиною хвилі обмежений в пропускній здатності, оскільки одна довжина хвилі використовується кількома ONU.

Для збільшення пропускної здатності пропонується архітектура DWDM-SPON, яка забезпечує кілька довжин хвиль в обох напрямках. Деталізоване зображення цієї архітектури наведено на рис. 3.6.

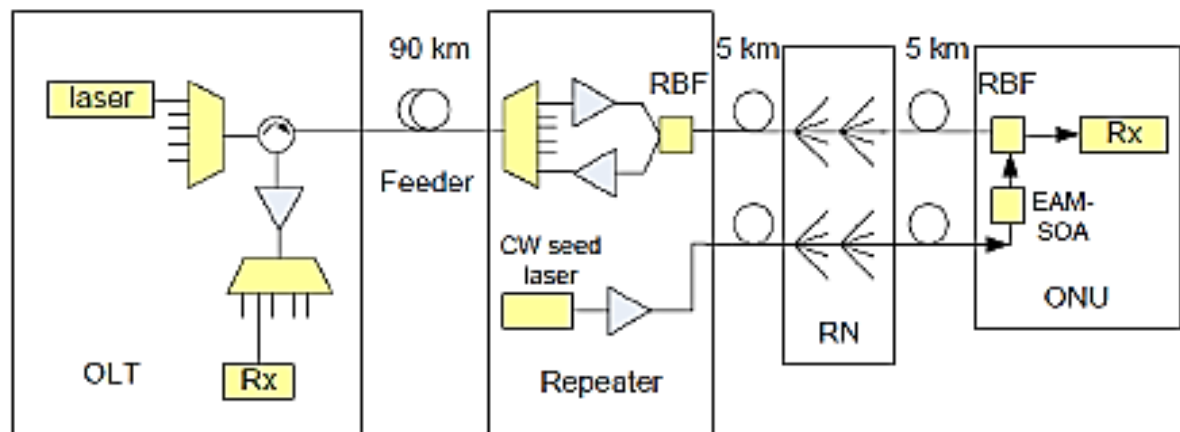


Рисунок 3.6 - Архітектура DWDM Super-PON

У цій схемі PON кожен розгалужувач потужності $1 \times N$ використовує два канали DWDM: один для висхідного потоку, а інший — для низхідного. «Синя» частина С-діапазону (1525 нм–1543 нм) формує низхідні канали, а «червона» частина (1547 нм–1565 нм) — висхідні канали, які розділяються за допомогою недорогих червоних або синіх фільтрів (RBF). ONU використовують спільне джерело. Модулятор електропоглинання — оптичний напівпровідниковий підсилювач (EAM-SOA) — може функціонувати як безбарвний ONU, що виконує як модуляцію, так і підсилення сигналу. На сайті ретранслятора знаходиться початковий лазер неперервної хвилі, який передає вихідне оптичне джерело до кожного ONU в групі розгалужувачів PON. Усі висхідні довжини хвиль підсилюються за допомогою підсилювача EDFA перед тим, як бути розподіленими до кожного приймача на OLT.

Хоча ця архітектура SPON дозволяє обслуговувати великі відстані та підтримувати велику кількість вузлів доступу, вона включає активні компоненти, такі як оптичні підсилювачі та вихідні джерела, які потребують електроживлення та регулярного технічного обслуговування. Це робить

архітектуру менш пасивною, що є однією з основних вимог для PON. Тому вона повинна конкурувати з іншими рішеннями за вартістю та зручністю управління.

3.7 Архітектура SUCCESS-DWA PON

Рисунок 3.7 демонструє архітектуру SUCCESS-DWA PON. Тут використовуються перебудовувані лазери (TL) та AWG на станційному обладнанні (CO), в той час як в ONU застосовуються WDM-фільтри і приймачі для пакетного режиму. Висхідний та низхідний трафік розділяються за допомогою широкосмугового фільтра WDM, який розташовується між AWG і PON. Ця архітектура вимагає, щоб усі довжини хвиль від OLT могли досягати кожного ONU через окремі фізичні PON. Наприклад, TL1 може передавати сигнал до PON1 через канали AWG {1, 5, 9, ...}, а також до PON2 через канали {2, 6, 10, ...}, а також підтримувати з'єднання з PON3 і PON4.

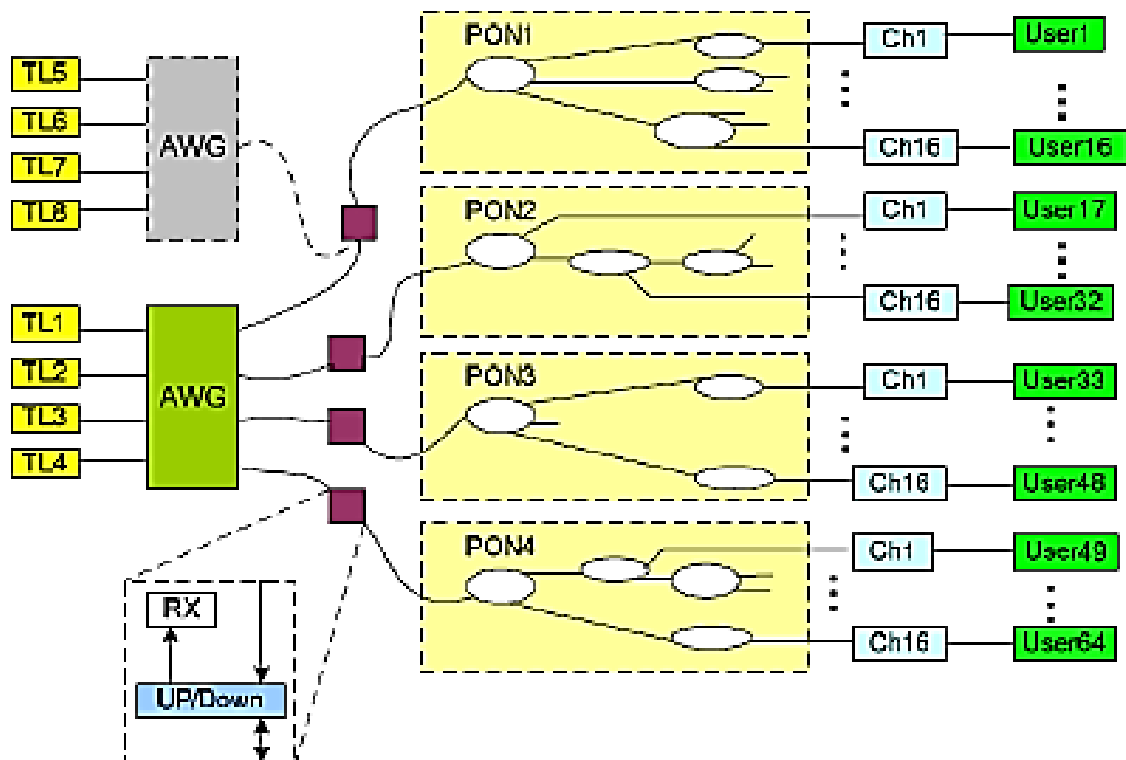


Рисунок 3.7 - Архітектура SUCCESS-DWA PON

Таким чином, TL може взаємодіяти з будь-яким користувачем на конкретному PON, визначаючи, яка довжина хвилі потрапляє в смугу пропускання користувача, а яка виходить з AWG до цього конкретного PON. Архітектура забезпечує масштабованість, спочатку розгортаючи один TL і один AWG на станційній стороні (CO), що обслуговує кілька абонентів на різних PON. З ростом попиту систему можна масштабувати, додаючи нові TL до існуючого AWG або інтегруючи додаткові AWG разом із більшим числом TL, як показано пунктирним AWG на рисунку 3.7.

SUCCESS-DWA PON вимагає ефективного алгоритму планування, оскільки лише один TL може обслуговувати будь-якого користувача в будь-який момент часу, а TL є спільним ресурсом, кількість яких зазвичай менша, ніж кількість користувачів.

Один з підходів полягає в використанні кількох віртуальних черг для уникнення блокування головної лінії. Можна застосовувати схему черги з найдовшою першою (FIFO) або іншу складнішу схему для визначення порядку обслуговування черг. Для запобігання одночасному доступу двох TL до однієї черги потрібен арбітр, щоб організувати черговість доступу. Цей підхід дозволяє уникнути колізій, але має обмеження в масштабованості для великої кількості користувачів. Інший підхід передбачає використання черг на передавачах: вхідні пакети розподіляються до передавача з найкоротшою чергою для мінімізації затримок. Якість обслуговування (QoS) можна забезпечити за допомогою визначення пріоритетів пакетів під час їх розподілу по чергах.

3.8 Висновки до розділу

Розглянуто різні архітектури WDM-PON (Wave Division Multiplexing Passive Optical Networks) та їх вплив на якість широкосмугового доступу. Показано, що вони надають значні можливості для покращення параметрів та ефективності передачі даних у сучасних оптичних мережах.

Архітектура CPON забезпечує високий рівень інтеграції різних технологій доступу та управління трафіком, що дозволяє зменшити витрати на інфраструктуру та поліпшити продуктивність мережі.

Впровадження архітектури LARNET дозволяє знизити навантаження на центральні маршрутизатори, оптимізуючи маршрутизацію трафіку у мережі доступу. Вона підвищує стабільність та знижує затримки.

PON з віддаленим опитуванням термінальної мережі RITENET надає можливість ефективнішого управління мережею шляхом реалізації гнучкої системи збору даних та моніторингу. Віддалене опитування дозволяє швидше реагувати на зміни в трафіку та оптимізувати розподіл ресурсів.

Багатоступенева архітектура WDM-PON на основі AWG дозволяє збільшити пропускну здатність мережі та забезпечити більш ефективну передачу сигналів за рахунок оптимального розподілу спектра. Це підвищує якість зв'язку та знижує ймовірність перешкод і затримок.

Застосування архітектури DWDM Super-PON забезпечує вищу ефективність використання оптичного спектра та значно покращує пропускну здатність мережі. Вона дозволяє здійснювати масштабування мережі без значних додаткових витрат, що є важливим у високошвидкісному доступі.

Архітектура SUCCESS-DWA PON забезпечує ефективну інтеграцію різних технологій для підвищення гнучкості та адаптивності мережі. Використання SUCCESS-DWA PON зменшує ймовірність виникнення проблем, пов'язаних з перевантаженням мережі.

Отже, архітектури WDM-PON мають значний вплив на покращення якості широкосмугового доступу. Вони дозволяють збільшити пропускну здатність, знизити затримки, підвищити стабільність роботи мережі та забезпечити більшу ефективність використання інфраструктури, що робить їх перспективними для розвитку оптичних мереж наступних поколінь.

4 РОЗРАХУНКИ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ

4.1 Розрахунок параметрів оптичної мережі

Щоб ефективно впровадити структуру дерева PON, необхідно у першу чергу визначити і взяти до уваги оптичні втрати, що виникають від пасивного обладнання.

Шляхом проведення експериментальних досліджень і аналізу ключових характеристик сучасних дільників потужності можна отримати формули для розрахунку втрат, які вносять оптичні симетричні і несиметричні дільники потужності з будь-якими коефіцієнтами поділу N в другому вікні прозорості для двох класів точності, а саме класу А ($\Delta\lambda \pm 20$ нм) і класу В ($\Delta\lambda \pm 40$ нм) [15].

Враховуючи збалансованість мережі, проведемо необхідні розрахунки. Емпіричний вираз для симетричного розподільника:

$$\alpha_{BHOС} = 10 \cdot \lg N + \beta \cdot \lg [N(N-1)] \text{ Дб}, \quad (4.1)$$

Поправочний коефіцієнт β має числові значення залежно від типу розподільника. Ці значення встановлені на основі результатів експериментів, аналізу паспортних даних та врахування інших даних. Експериментальні дослідження симетричних планарних дільників потужності 1x2, 1x3, 1x16, 1x32 проводилися в другому вікні прозорості [15]. Значення β наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення конфіцієнта β

β	Дільник	1x2	1x3	1x4	1x8	1x12	1x16	1x24	1x32	1x64
	Клас В	0,2	0,34	0,4	0,55	0,65	0,7	0,85	0,86	0,8
	Клас А	0,15	0,25	0,25	0,3	0,35	0,35	0,15	0,4	0,4

З наведеної таблиці видно, що чим більш кількісно складний розподільник, тим більше значення поправочного коефіцієнта та втрат, що вносяться через так звану інтерференцію у структурі розподільника.

Використовуючи дані таблиці 4.1, дамо оцінку величини внесених втрат симетричного розподільника в залежності від числа вихідних портів. Результати розрахунків наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Втрати симетричного розподільника

Число вихідних портів N	Втрати, які виникають для симетричного розподільника, Дб	
	Для класу В	Для класу А
2	3,763	3,486
3	6,087	5,720
4	7,534	6,969
6	9,487	8,920
8	11,115	10,217
16	14,694	13,358
32	18,282	16,657

Різниця між експериментальними та розрахованими значеннями втрат, отриманими за формулою (4.1), становить від 0,05 до 0,2 Дб [15]. Вираз для несиметричного розподільника потужності з числом вихідних портів N виглядає так:

$$\alpha_{\text{ВНОС}} = 10 \cdot \lg \frac{100}{P} + \beta \cdot \lg \left[\frac{100}{P} (N-1) \right] \text{ Дб}, \quad (4.2)$$

де коефіцієнт β для класу А дорівнює 0,15, а для класу В - 0,25;

P - це відсоток потужності, виведеної в даний порт.

Відповідно до даних у таблиці 4.2, розрахункова різниця між числовими значеннями внесених втрат, які були виміряні експериментально та розраховані, становить від 0,05 до 0,2 дБ, і максимально до 0,3 дБ. За

допомогою отриманих виразів можна розрахувати втрати з похибкою, яка не перевищує 5%, як показано в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Втрати від несиметричного розподільника потужності

Процент потужності, що виводиться на кожен порт, %	Втрати, що вносяться, Дб			
	Клас В	$\beta=0,25$	Клас А	$\beta=0,15$
10/90	10,25	0,470	10,15	0,474
20/80	7,165	0,993	7,096	0,984
30/70	5,36	1,589	7,096	0,985
40/60	4,079	2,275	4,039	2,254

Оцінимо ефективність роботи мережі PON для конкретного сценарію.

Теоретичний радіус дії мережі PON складає 20 км, але практичні параметри визначаються бюджетом втрат на конкретній гілці дерева. Для розрахунків використовуються найгірші значення втрат, чутливості та потужності випромінювання передавачів. Зазвичай у таких розрахунках застосовуються таблиці для втрат в спліттерах, зокрема: 0,05 дБм для втрат на зварюванні, 0,36 дБм/км для згасання в волокні при довжині хвилі 1310 нм (для 1550 нм згасання становить 0,22 дБм/км), втрати на механічних з'єднаннях становлять 0,5 дБм, а втрати при перегині можуть коливатися від 0,15 до 7 дБм і більше (це значення визначається за допомогою вимірювальних приладів безпосередньо на об'єкті) [16].

Далі потрібно підсумувати всі втрати, що виникають на елементах, які впливають на лінію між головною станцією OLT і абонентським комплектом ONT. До цього значення додається згасання в волокні на всій довжині лінії від найбільш віддаленого абонента до OLT. На основі цих даних можна розрахувати загальний бюджет втрат у мережі PON [16].

Наступним кроком є розрахунок оптичного бюджету потужності, який зазвичай складає 30 дБм (це гарантована максимальна величина, вказана виробником). Якщо отримане значення перевищує 30 дБм, необхідно проводити додаткові тести.

Ефективна робота мережі забезпечується, коли загальний бюджет втрат не перевищує бюджет потужності.

Окремо варто враховувати передачу кабельного телебачення (CATV) і роботу зварених розподільників. Для CATV телевізійний сигнал має потужність від 7 дБм (у найгіршому випадку) до 24 дБм (при використанні дорогих передавачів або підсилювачів EDFA). Сигнал до телевізійного приймача (як окремого пристрою або частини ONU) повинен надходити з мінімальною потужністю -12 дБм. Тому використання зварених розподільників вимагає особливої уваги, і перед підключенням нового абонента рекомендується повторно перевіряти мережу PON, щоб переконатися, що сигнал для кожного абонента знаходиться в межах чутливості телевізійного приймача [16].

Вихідні дані для розрахунку.

Максимальна відстань від OLT до ONT у дереві складає 250 метрів.

Потужність передавача SFP модуля OLT: "SFP TX PWR" = +5 дБ,
потужність передавача SFP модуля ONT: "SFP TX PWR" = +2 дБ;

Чутливість приймача "ONU RX SENS" = -28 дБ, SFP модуля OLT: "SFP RX SENS" = -32 дБ.

Отже, оптичний бюджет лінії складе:

$$\text{OLT} \rightarrow \text{ONT}: (P=+5-5-(-28)) = 33 \text{ дБ};$$

$$\text{ONT} \rightarrow \text{OLT}: (P=+2-2-(-32)) = 34 \text{ дБ}.$$

Втрати через роз'ємні з'єднання (конектори) дорівнюють 0,15 (0,3) дБ, тоді як втрати через нероз'ємні з'єднання (зварювання) становлять 0,05 (0,15) дБ.

Згасання в стандартному волокні типу G.652.D на кожному кілометрі при довжині хвилі 1310 нм складає 0,36 дБ/км, а при довжині хвилі 1550 нм - 0,22 дБ/км. Для резервування у роботі в мережі передбачено експлуатаційний запас у 3 дБ.

Наступним етапом аналізу є розрахунок максимально можливих втрат у дереві при використанні спліттерів за такою схемою:

$$\text{OLT} \rightarrow 1 \times 8 \rightarrow 1 \times 8 \rightarrow \text{ONT}.$$

Для оцінки працездатності лінії розраховуємо різницю між загальною потужністю та сумою втрат.

$$33 - 24,175 = 8,825 \text{ дБ}.$$

У цьому конкретному випадку, де використовуються 2 конекторних з'єднання, 4 зварні з'єднання, 2 сплітери 1x8 та лінія довжиною 250 м, максимальні можливі втрати складаються з таких компонентів:

- 0,15 дБ (конектор OLT)
- 0,05 дБ (зварювання)
- 10,3 дБ (згасання спліттера)
- 0,05 дБ (зварювання)
- 0,05 дБ (зварювання)
- 10,3 дБ (згасання спліттера)
- 0,05 дБ (зварювання)
- 0,15 дБ (конектор ONT)
- 0,075 дБ (втрати в кабелі на 250 м)
- 3 дБ (експлуатаційний запас)

Загальні втрати становлять 24,175 дБ.

При розрахунках для проекрованої мережі, що стосуються проходження сигналу від ONT до OLT, передбачається, що сигнал буде передаватися на довжині хвилі 1310 нм, де коефіцієнт загасання становить 0,35 дБ/км, оскільки це напрямок висхідного потоку.

Для визначення характеристик оптичних розгалужувачів і подальших розрахунків мережі необхідно врахувати втрати, характерні для цієї мережі.

Основними є втрати на роз'ємних з'єднаннях (0,3 дБ) та на зварних з'єднаннях (0,05 дБ) [18].

Згідно з усіма розрахунками, ці параметри відповідають нормам, і мережа PON працюватиме з запасом потужності 8,825 дБ.

4.2 Моделювання передавання трафіку в PON для одиничного користувача

Для визначення впливу типів сервісів у фіксованих і мобільних мережах на характеристики трафіку необхідно провести дослідження процесу передавання інформаційних потоків з використанням мережних аналізаторів. У цьому дослідженні були використані програми CommView та Wireshark, які дозволяють перехоплювати інформаційні потоки, що проходять через мережеві інтерфейси. CommView використовувалась для аналізу співвідношення пакетів за їх розміром та протоколами на мережевому, транспортному та додаткових рівнях. Wireshark, в свою чергу, надає можливість збирати статистику про інтенсивність мережного трафіку та відображати її у вигляді графічних залежностей.

Для дослідження трафіку IP-телефонії було обрано Skype. Користувачі Skype розподілені по комп'ютерах у мережі, що дозволяє масштабувати її до великих розмірів (на сьогоднішній день понад 100 мільйонів користувачів, з яких 15-25 мільйонів онлайн) без потреби в дорогій централізованій інфраструктурі серверів. Єдиним центральним елементом є сервер ідентифікації, на якому зберігаються облікові записи та резервні копії списків контактів. Центральний сервер потрібен лише для встановлення зв'язку, після чого комп'ютери обмінюються голосовими даними або безпосередньо, або через Skype-посередника (супервузол з зовнішньою IP-адресою та відкритим TCP-портом для Skype). Наприклад, якщо два комп'ютери знаходяться в одній локальній мережі і встановили між собою Skype-з'єднання, можна відключити

з'єднання з Інтернетом, і розмова продовжиться до її завершення або до збоїв у мережі.

Для статистичних досліджень були проведені сеанси чату та голосових дзвінків, кожен з яких тривав по 30 хвилин. Результати аналізу сумарної інтенсивності трафіку під час користування Skype у режимі чату представлені на рисунку 4.1.

На рисунку 4.1 (а) видно, що пакетний трафік у режимі чату має стабільну інтенсивність (інтервал А). Проте, корисне навантаження періодично зростає з однаковою амплітудою під час відправлення повідомлень (інтервал Б). Результати аналізу трафіку Skype у режимі розмови показані на графіку 4.1 (б).

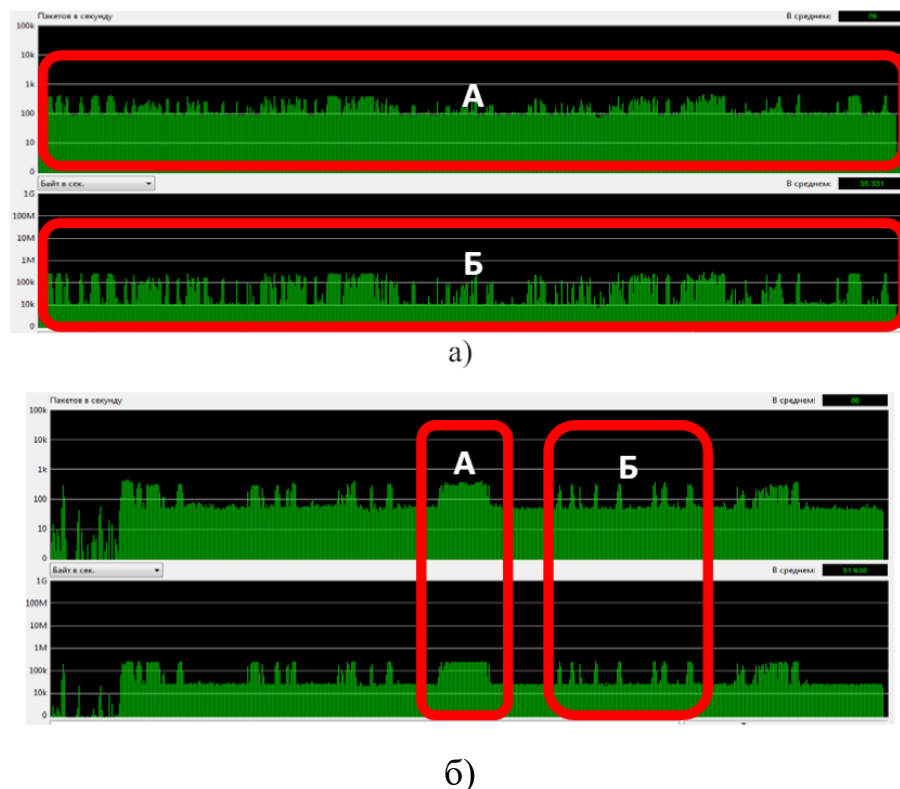


Рисунок 4.1 – Обсяг передачі даних через мережний інтерфейс під час використання Skype у чат-режимі – (а), у режимі голосового спілкування – (б).

На рисунку 4.2 відображено типовий профіль трафіку, створений одним абонентом протягом однієї хвилини.

Зафіксований процес на рисунку 4.2 демонструє випадковий характер змін трафіку, що генерується абонентом у мережі. На рисунку 4.3 показана його ймовірнісна щільність розподілу.

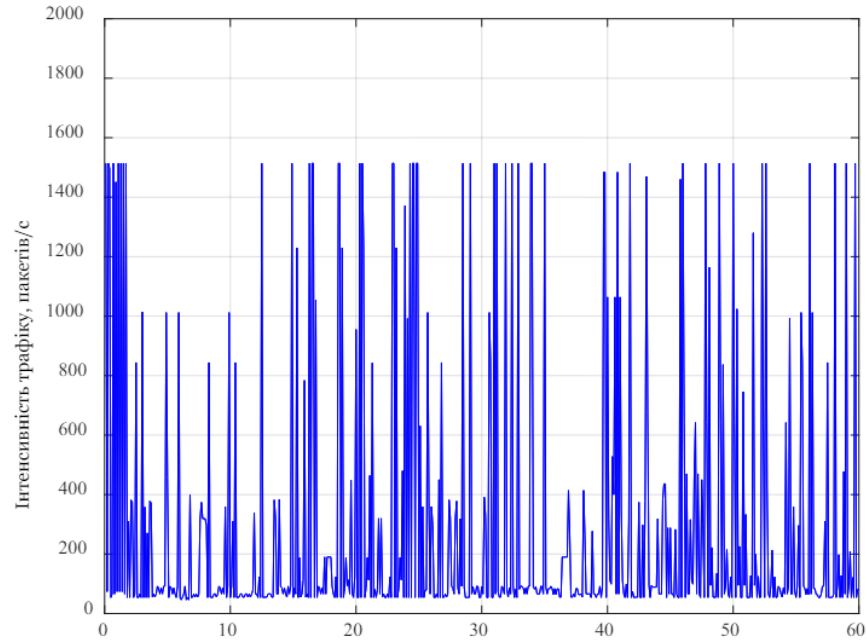


Рисунок 4.2 – Профіль трафіку одного абонента протягом однієї хвилини

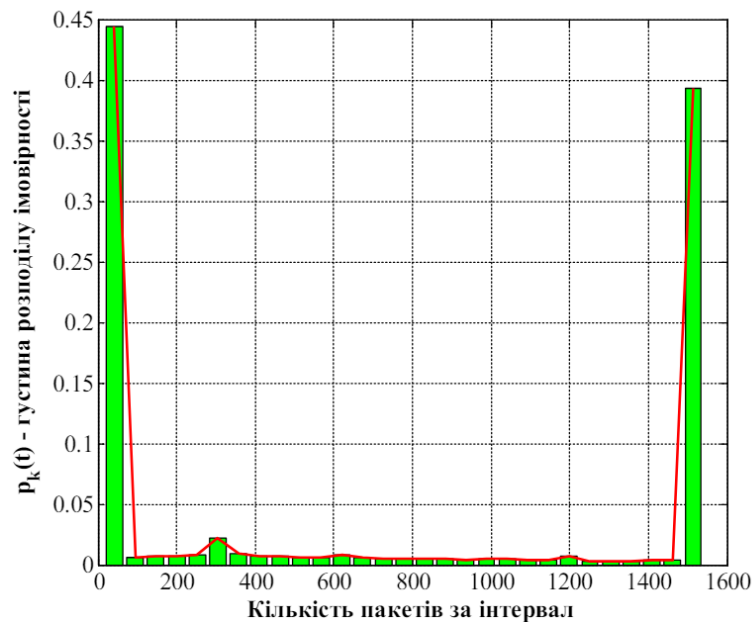


Рисунок 4.3 – Ймовірнісна щільність розподілу для трафіку, що генерується одним користувачем

Ймовірнісна функція розподілу, рис. 4.3, відображає відсутність чіткої закономірності в інтенсивності трафіку. Статистика говорить, що трафік переважно складається з пакетів мінімального розміру (64 байти) та максимального розміру (1518 байт).

Отримані результати дають змогу визначити необхідні параметри для основної транспортної мережі доступу. На основі виявлених статистичних взаємозв'язків здійснюється попередня оцінка співвідношення між вимогами до пропускної здатності конвергентних оптичних мереж доступу в низхідному та висхідному напрямках передачі даних.

4.3 Моделювання статистичних характеристик агрегованого трафіку

Дослідження статистичних характеристик мережного трафіку, виконане в попередньому розділі, обмежувалося аналізом лише одного мережного вузла. Це обмеження не дає змоги повною мірою оцінити вплив різних сервісів на характеристики трафіку в мережі. Тому необхідно провести додатковий аналіз трафіку на виході агрегаційного вузла.

Для цього було змодельовано трафік у гетерогенній мережі мобільного зв'язку. Бездротовий сегмент мережі включає велику кількість мікрокомірок, що розташовані на відстані 50-200 метрів одна від одної, і доповнюється макрорівнем для забезпечення рівномірного покриття. Макрокомірки розміщені на відстані близько 500 метрів одна від одної.

На основі зазначеної моделі процесу агрегації трафіку в мережі мобільного зв'язку отримано часові характеристики агрегованого трафіку, що генерується абонентами [17]. На рисунку 4.4 представлений профіль агрегованого трафіку, а на рисунку 4.5 наведена його ймовірнісна щільність розподілу.

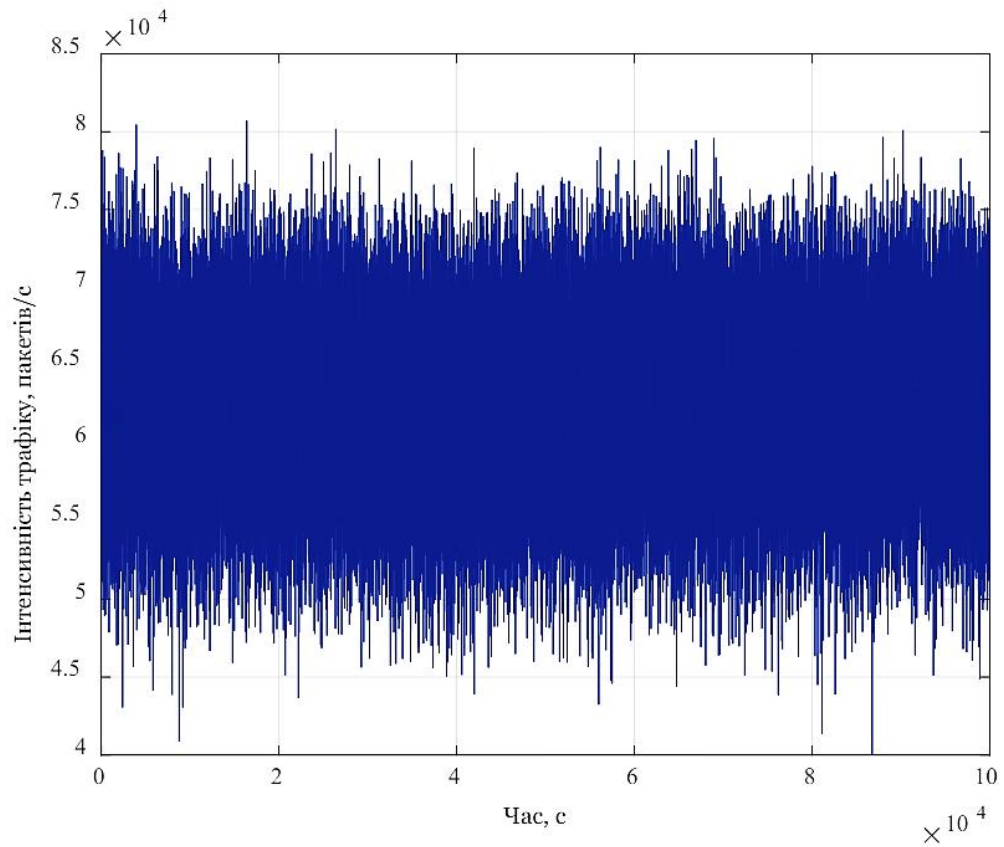


Рисунок 4.4 – Профіль агрегованого трафіку протягом однієї хвилини

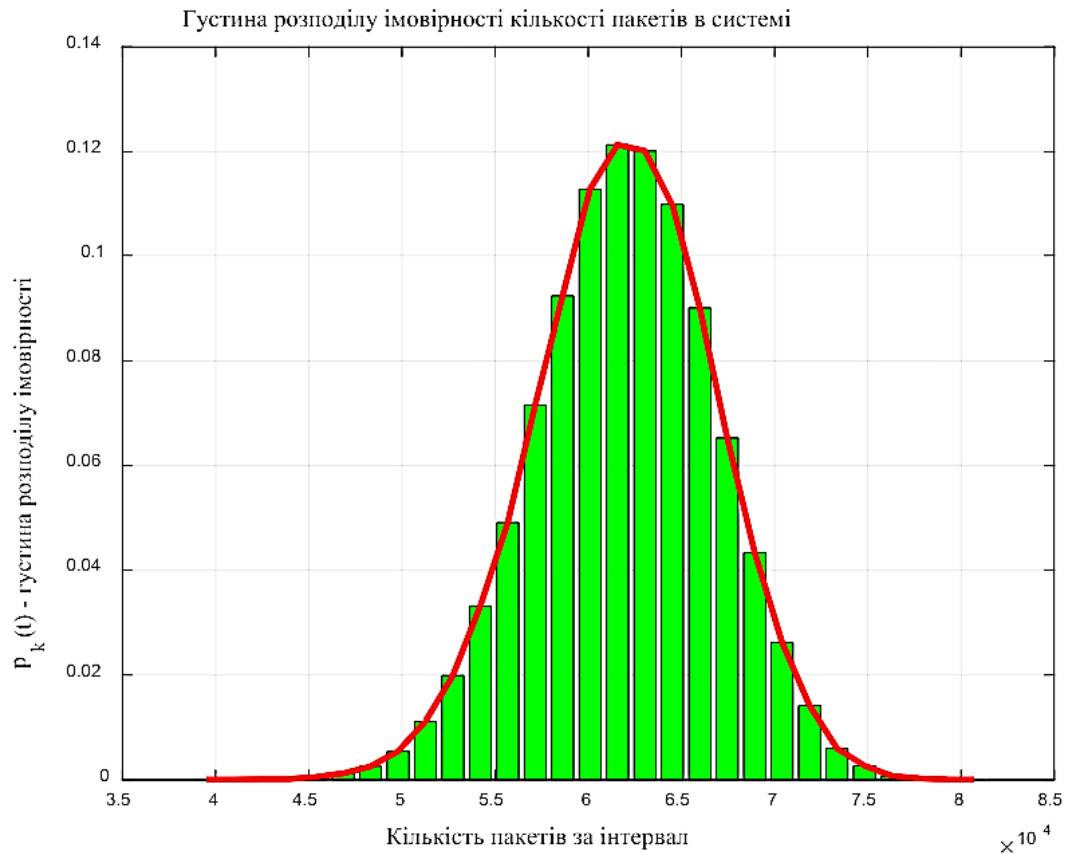


Рисунок 4.5 – Густина розподілу ймовірності для агрегованого трафіку

На графіку 4.4 видно чітку залежність зміни інтенсивності трафіку на агрегаційному рівні. Самоподібність трафіку підтверджується значенням параметра Херста $H=0.76$, що свідчить про стабільність процесу надходження пакетів до агрегуючого маршрутизатора. Графік 4.5 показує залежність щільності ймовірності для агрегованого трафіку, яка вказує на те, що інтенсивність трафіку підпорядковується певному закону розподілу.

Моделювання проводилося для трьох варіантів спектральної ефективності радіоканалів: 5, 10 та 20 біт/с/Гц. Для кожного значення спектральної ефективності було визначено залежність пропускної здатності сегменту опорної транспортної мережі від кількості мікрокомірок. Результати показують, що пропускна здатність мережі зростає зі збільшенням кількості мікрокомірок. Крім того, при фіксованій кількості мікрокомірок пропускна здатність також зростає із підвищенням середньої спектральної ефективності (рисунок 4.6).

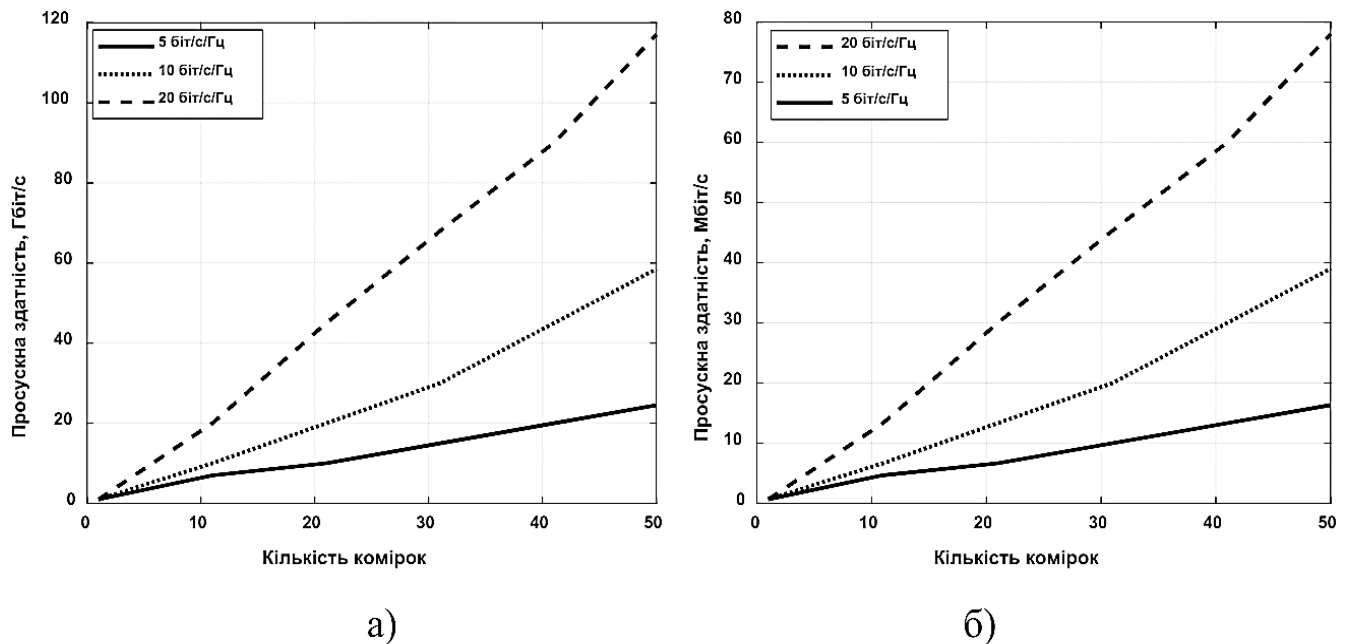


Рисунок 4.6 – Залежність пропускної здатності опорної транспортної мережі від кількості мікрокомірок у низхідному (а) та висхідному напрямках передавання (б)

Згідно з розрахунками, пропускна спроможність опорної транспортної мережі розподіляється наступним чином: 60% для низхідного напрямку і 40% для висхідного, що значно відрізняється від традиційного співвідношення 80% до 20%, яке використовується в розрахунках для існуючих пасивних оптичних мереж фіксованого доступу.

Результати моделювання свідчать, що при високих значеннях спектральної ефективності радіоканалів у мережах мобільного зв'язку потреби в пропускній здатності опорної транспортної мережі перевищують максимально можливу пропускну здатність одного ресурсного блоку конвергентної оптичної мережі доступу.

Для вирішення цієї проблеми та розширення масштабованості мережі пропонується алгоритм агрегації ресурсних блоків у конвергентних оптичних мережах доступу. Цей алгоритм переналаштовує корисне та службове навантаження ресурсних блоків, що дозволяє формувати агреговані блоки розмірами 16×8 (WDM 16), 24×8 (WDM 24) та 32×8 (WDM 32) [17].

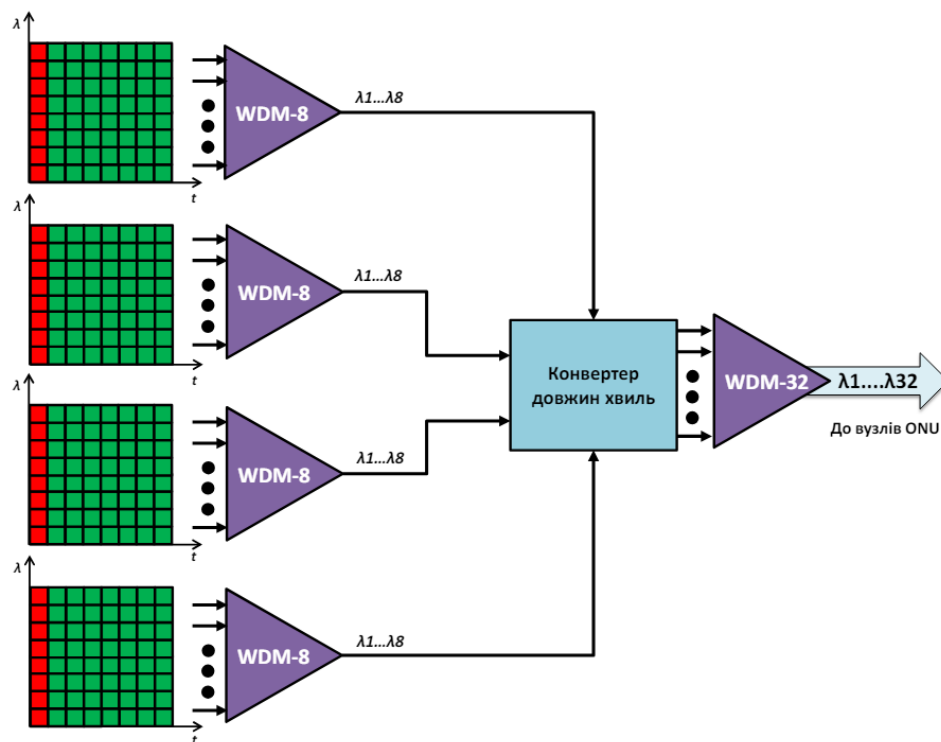


Рисунок 4.7 – Модель процесу агрегації ресурсних блоків для збільшення пікової пропускної здатності у конвергентних оптичних мережах доступу

Завдяки цьому, пропускна здатність сегмента або комірки може збільшуватися до 160, 240 або 320 Гбіт/с у періоди пікового навантаження, шляхом агрегації 2, 3 або 4 ресурсних блоків відповідно.

$$C_{RB} = \frac{4 \cdot 19440 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 8}{125 \cdot 10^{-6}} = 318.50496 \text{ Гбіт} / \text{с}. \quad (4.3)$$

На рисунку 4.7 зображено функціональну модель методу агрегації ресурсних блоків.

Врахування статистичних даних у запропонованій моделі конвергенції фіксованих оптичних мереж доступу з опорною транспортною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку дозволяє значно підвищити ефективність використання пропускної здатності оптичних каналів у транспортних мережах [17].

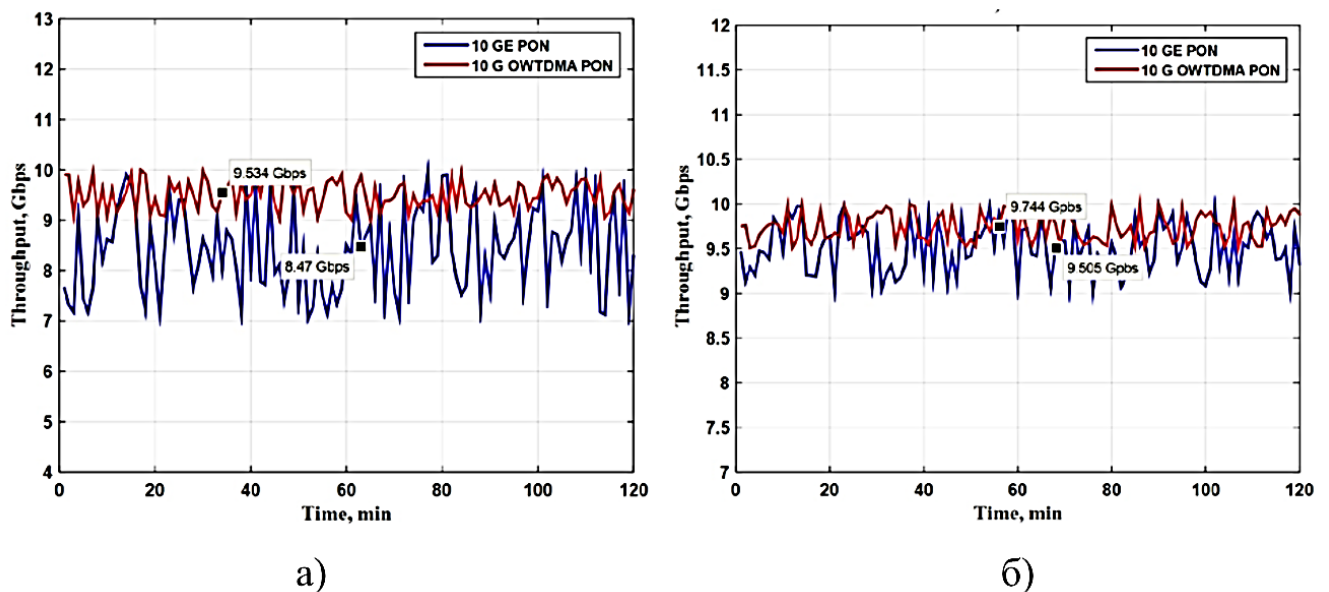


Рисунок 4.8 – Порівняння пропускної здатності запропонованої оптичної мережі з існуючими мережами 10 GEPON для висхідного каналу (а) та низхідного каналу (б)

Для оцінки ефективності нової моделі розподілу каналних ресурсів порівняно з існуючими мережами 10 GEPON (10 Gigabit Ethernet PON) було проведено моделювання за наступними умовами: середній розмір пакету — 1 кБ, кількість вхідних потоків — 24, інтенсивність вхідних потоків — 10 Гбіт/с, тривалість моделювання — 50 годин. Результати моделювання для обох напрямків передачі зображено на рисунку 4.8.

Рисунок 4.8 показує, що розроблений алгоритм мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки підвищує коефіцієнт використання пропускної здатності пасивної оптичної мережі до 15% у висхідному каналі та до 5% у низхідному каналі. При цьому спостерігається залежність від поточної інтенсивності трафіку.

4.4 Моделювання методу балансування трафіку між сегментами мережі доступу з урахуванням їх взаємозв'язності

З урахуванням взаємозв'язності сегментів мережі доступу з існуючими мережами з метою порівняння ефективності методу балансування трафіку було проведено аналіз коефіцієнту використання каналів при зміні інтенсивності навантаження за таких вихідних умов:

- середній розмір пакету 1 кБ;
- кількість вхідних потоків 24;
- інтенсивність вхідних потоків 10 Гбіт/с;
- тривалість моделювання 50 годин.

На рисунку 4.9 наведено профіль та щільність розподілу ймовірності змодельованого вхідного трафіку.

Параметр Херста для змодельованого трафіку складає $H=0.92$. Інтенсивність надходження викликів описується нормальним законом. Рисунок 4.10 демонструє порівняльну залежність коефіцієнта використання пропускної здатності оптичних ліній зв'язку.

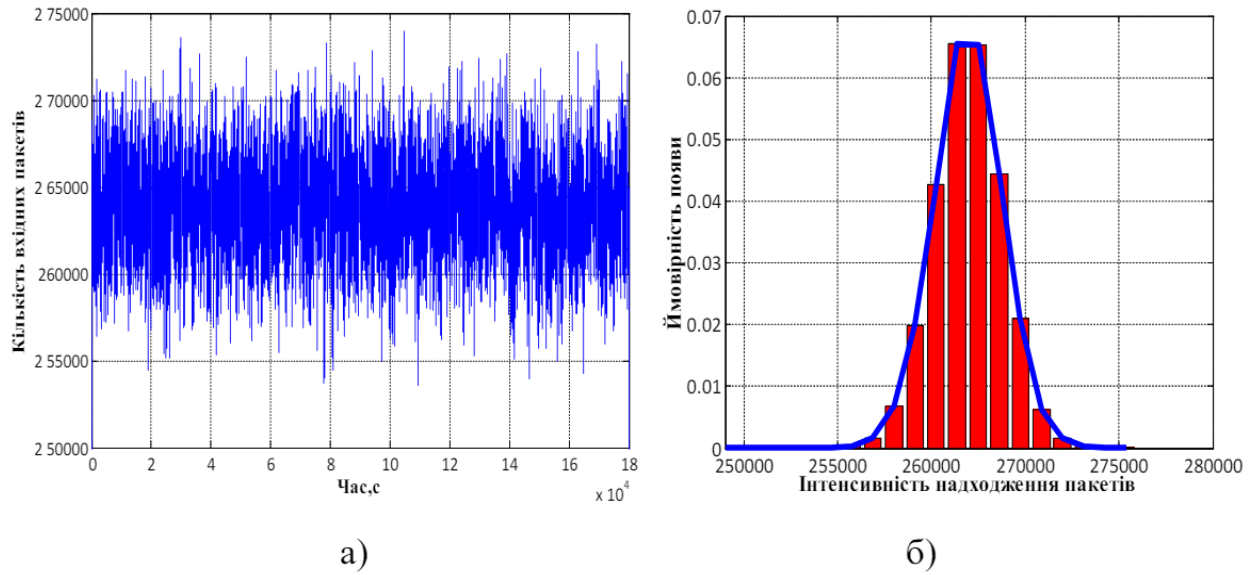


Рисунок 4.9 – Профіль (а) та щільність розподілу ймовірності (б) для дослідженого трафіку

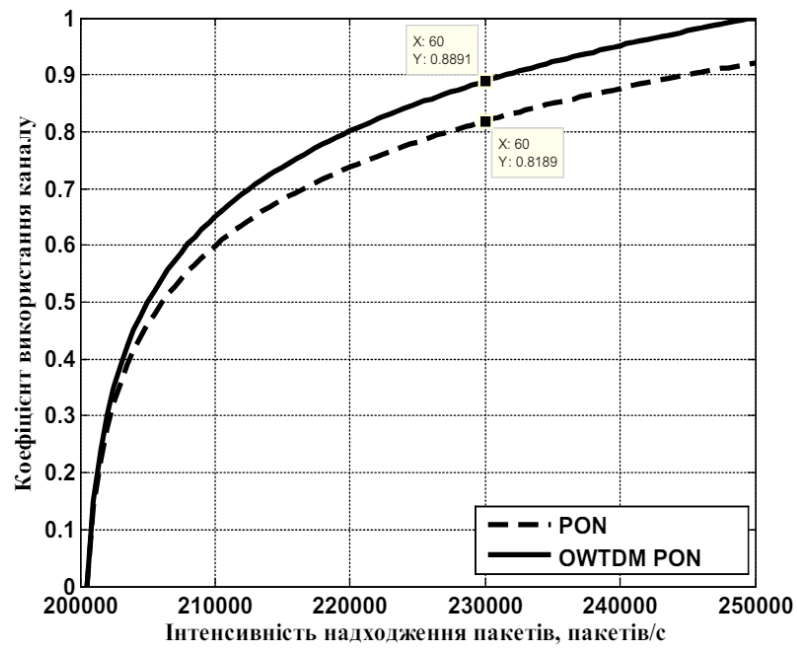


Рисунок 4.10 – Порівняльні залежності ефективності використання ресурсів від інтенсивності трафіку

4.5 Висновки до розділу

За результатами проведених досліджень, розподіл пропускної спроможності опорної транспортної мережі становить 60% для низхідного напрямку передачі та 40% для висхідного, що значно відрізняється від традиційного співвідношення 80% до 20%, яке зазвичай використовується в пасивних оптичних мережах.

Моделювання характеристик трафіку в гетерогенних мережах мобільного зв'язку дозволило визначити вимоги до пропускної здатності опорної мережі. Результати показали, що при високих значеннях спектральної ефективності радіоканалів мережі мобільного зв'язку, потреби в пропускній здатності опорної транспортної мережі можуть перевищувати максимально доступну пропускну здатність одного ресурсного блоку конвергентної оптичної мережі доступу, яка становить близько 80 Гбіт/с. Для підвищення масштабованості мережі було запропоновано алгоритм агрегації ресурсних блоків, що дозволяє в періоди пікового навантаження підвищувати пропускну здатність сегмента або комірки до 320 Гбіт/с.

Моделювання підтвердило, що метод балансування трафіку, який враховує взаємозв'язок між окремими сегментами мереж доступу, забезпечує більш ефективне використання наявної пропускної здатності. Завдяки спектрально-часовому мультиплексуванню досягається гнучкість у використанні ресурсів, що дозволяє уникнути явища недовантаження каналів. Результати моделювання показали, що запропонований метод дозволяє підвищити коефіцієнт використання каналу на 7%.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та

проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	54	54	54
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		54,0		

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	75	75	75
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	75,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [22]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 54,0, k_{\text{теор}} = 75,0$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 54,0 + 0,4 \cdot 75,00 = 62,40 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі», даний рівень становить 62,40 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ($З_o$) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [22]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 18400,00 \cdot 8 / 22 = 6181,84 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Науковий керівник дослідної роботи	18400,00	772,73	8	6181,84
Інженер-дослідник телекомунікаційних систем та мереж	17450,00	750,00	22	16500,00
Всього				22681,84

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{3m}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [22];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,70 \cdot 1,15 / (22 \cdot 8) = 88,86 \text{ грн.}$$

$$Z_{pl} = 88,86 \cdot 4,50 = 399,89 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Установка обчислювального обладнання для проведення досліджень	4,50	5	1,70	88,86	399,89
Підготовка робочого місця дослідника мереж	5,00	6	2,00	104,55	522,73
Інсталяція програмного забезпечення проведення аналітичного дослідження	5,00	5	1,70	88,86	444,32
Підготовка дослідних баз даних	9,00	6	2,00	104,55	940,91
Ведення характеристик базових модулів аналізу моделей оптичних мереж	8,00	5	1,70	88,86	710,91
Компіляція програмних модулів імітації широкопasmового доступу	4,00	6	2,00	104,55	418,18
Налагодження блоків імітаційної моделі	4,00	5	1,70	88,86	355,45
Всього					3792,39

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$З_{\text{доо}} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{\text{доо}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{доо}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 12%.

$$З_{\text{доо}} = (22681,84 + 3792,39) \cdot 12 / 100\% = 3176,91 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$З_n = (З_o + З_p + З_{\text{доо}}) \cdot \frac{H_n}{100\%} \quad (5.6)$$

де H_n – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$З_n = (22681,84 + 3792,39 + 3176,91) \cdot 22 / 100\% = 6523,25 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Підвищення якості широкопasmового доступу в пасивній оптичній мережі».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\epsilon j}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{vj} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 196,00 \cdot 1,12 - 0 \cdot 0 = 658,56 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір канцелярський офісний ECONOMIC (A4-500)	196,00	3,0	0	0	658,56
Папір для заміток ECONOMIC (A5)-60	114,00	5,0	0	0	638,40
Начиння канцелярське DATUM FX	155,00	3,0	0	0	520,80
Органайзер офісний DATUM Office	201,00	3,0	0	0	675,36
Картридж для принтера HP-210A	752,00	2,0	0	0	1684,48
Диск оптичний VEKO-10 (CD-R)	27,00	5,0	0	0	151,20
Оптоволокно 0,75 мм (50 м)	22,00	50,0	0	0	1232,00
Всього					5560,80

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі» відсутні.

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.8)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 34420,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 38550,40 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.7 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Одноволоконний оптичний мультиплексор Cor-X DWDM-100G-BiDi-08-16wave-1 – 1шт.	1	34420,00	38550,40
Сплітер (розгалужувач) одномодовий SFT 01x32 – 1шт.	1	650,00	728,00
Всього			39278,40

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{прог}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де $C_{\text{прог}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 7890,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 8284,50 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Середовище математичного інженерного моделювання DS SolidWorks	1	7890,00	8284,50
Всього			8284,50

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{C_{\text{б}}}{T_{\text{г}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (5.10)$$

де $C_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{\text{вик}}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\text{г}}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{\text{обл}} = (37699,00 \cdot 1) / (4 \cdot 12) = 785,40 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.9 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	37699,00	4	1	785,40
Програмований комутатор Programmable switch DC90HrRT3	4500,00	4	1	93,75
Програмне забезпечення підтримки оптоволоконних мереж	9600,00	4	1	200,00
Місце дослідника спеціалізоване	7890,00	6	1	109,58
Офісна оргтехніка	8599,00	6	1	119,43
Дослідницька лабораторія	380000,00	30	1	1055,56
Всього				2363,72

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.11)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,32 \cdot 160,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 562,18 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	0,32	160,0	562,18
Програмований комутатор Programmable switch DC90HrRT3	0,03	80,0	26,35
Одноволоконний оптичний мультиплексор Cor-X DWDM-100G-BiDi-08-16wave-1 – 1шт.	0,09	80,0	79,06
Місце дослідника спеціалізоване	0,10	160,0	175,68
Офісна оргтехніка	0,40	3,0	13,18
Всього			856,44

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\text{с}} = (З_{\text{о}} + З_{\text{р}}) \cdot \frac{H_{\text{іс}}}{100\%}, \quad (5.12)$$

де $H_{\text{іс}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{\text{іс}} = 55\%$.

$$I_{\text{с}} = (22681,84 + 3792,39) \cdot 55 / 100\% = 14560,82 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{\text{нзв}} = (З_{\text{о}} + З_{\text{р}}) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де $H_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{\text{нзв}} = 100\%$.

$$B_{\text{нзв}} = (22681,84 + 3792,39) \cdot 100 / 100\% = 26474,23 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення якості широкопasmового доступу в пасивній оптичній мережі» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{\text{заг}} = З_{\text{о}} + З_{\text{р}} + З_{\text{оод}} + З_{\text{н}} + M + K_{\text{с}} + B_{\text{снел}} + B_{\text{нрз}} + A_{\text{обл}} + B_{\text{е}} + B_{\text{св}} + B_{\text{сп}} + I_{\text{с}} + B_{\text{нзв}}. \quad (4.14)$$

$$B_{\text{заг}} = 22681,84 + 3792,39 + 3176,91 + 6523,25 + 5560,80 + 0,00 + 39278,40 + 8284,50 + 2363,72 + 856,44 + 0,00 + 0,00 + 14560,82 + 26474,23 = 133553,29 \text{ грн.}$$

Загальні витрати $ЗВ$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$3B = \frac{B_{\text{заг}}}{\eta}, \quad (5.15)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,95$.

$$3B = 133553,29 / 0,95 = 140582,41 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Підвищення якості широкопasmового доступу в пасивній оптичній мережі» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.16)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Приймемо $I=3$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n=0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n=1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n=2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n=3$, коли

результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n=2$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R=4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R=3$; якщо нижче відомих результатів, то $R=1$. Прийmemo $R=4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 140582,41$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [22].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 3^2 \cdot 2 \cdot 4 / 140,6 \cdot 0,08 = 6,15.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Підвищення якості широкопasmового доступу в пасивній оптичній мережі» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення якості широкопasmового доступу в пасивній оптичній мережі» складають 140582,41 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення якості широкопasmового доступу в пасивній оптичній мережі» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВКИ

Розглянуто основні характеристики технології PON, види топології мереж, архітектуру, побудову та режими роботи джерел випромінювання для технології WDM-PON, функціонування різних стандартів.

Проведено огляд напрямків підвищення якості широкосмугового доступу, які базуються на новітніх стандартах XG-PON та NG-PON2. Розглянуто схеми співіснування основних стандартів технології PON та показано шляхи удосконалення та нарощування архітектури існуючих мереж при впровадженні нових стандартів. Наведено особливості новітніх стандартів XG-PON, XGS-PON та NG-PON2 та їх основні технічні характеристики.

Показано, що XG-PON, XGS-PON та NG-PON2 є потужними і перспективними стандартами для створення високошвидкісних оптичних мереж доступу. Вони забезпечують гнучкість, високу пропускну здатність і сумісність з попередніми поколіннями технологій PON, що робить їх ідеальним рішенням для широкомасштабних і швидко зростаючих телекомунікаційних мереж, особливо в умовах постійно зростаючого попиту на швидкість і обсяг передаваних даних. Ефективність зазначених стандартів підкріплена високою швидкістю передачі даних завдяки підтримці багатопозиційних видів модуляції та технології WDM.

Розглянуто різні архітектури WDM-PON (CPON, LARNET, RITENET, багатоступенева архітектура WDM-PON на основі AWG, DWDM Super-PON, SUCCESS-DWA PON) та їх вплив на якість широкосмугового доступу. Показано, що вони надають значні можливості для покращення параметрів та ефективності передачі даних у сучасних оптичних мережах.

Узагальнюючи, можна сказати, що архітектури WDM-PON, зокрема ті, що передбачають використання сучасних технологій мультиплексії та оптимізації ресурсів, мають значний вплив на покращення якості широкосмугового доступу. Вони дозволяють збільшити пропускну здатність, знизити затримки, підвищити стабільність роботи мережі та забезпечити більшу ефективність

використання інфраструктури, що робить їх перспективними для розвитку оптичних мереж наступних поколінь.

Проведені розрахунки показали, що розподіл пропускної спроможності опорної транспортної мережі складає 60% на низхідний напрямок передавання і 40% на висхідний, що значно відрізняється від традиційного співвідношення 80% на 20%, яке зазвичай використовується для існуючих пасивних оптичних мереж.

Проведено моделювання характеристик трафіку в гетерогенних мережах мобільного зв'язку, щоб визначити вимоги до пропускної здатності опорної мережі. Результати моделювання показують, що при високих значеннях спектральної ефективності радіоканалів мережі мобільного зв'язку, вимоги до пропускної здатності опорної транспортної мережі перевищують максимально можливе значення пропускної здатності одного ресурсного блоку конвергентної оптичної мережі доступу, яке становить біля 80 Гбіт/с. Тому, для підвищення масштабованості мережі, було запропоновано алгоритм агрегації ресурсних блоків, який дає можливість у періоди пікового навантаження підвищувати пропускну здатність для сегменту або комірки до 320 Гбіт/с.

Моделювання підтверджує, що метод балансування трафіку, який враховує зв'язок між окремими сегментами мереж доступу, ефективніше використовує наявну пропускну здатність. Спектрально-часове мультиплексування покращує гнучкість використання ресурсів та усуває явище недовантаження каналу. Результати моделювання свідчать, що перевага запропонованого методу становить приблизно 7% з точки зору коефіцієнта використання каналу.

Виконана економічна частина, яка підтверджує ефективність проведених досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Б. Каток. Волоконно - оптичні системи зв'язку. – К., Велар, 1999. – 483 с.
2. Основні напрямки стандартизації оптичних кабелів зв'язку / Каток В.Б., Ковтун О.С., Руденко І.Е. – Зв'язок, No 4, 2005. – с. 17-22.
3. Проектування лінійного волоконно – оптичного тракту [Електронний ресурс]: <http://ua-referat.com/>.
4. Хмелев К.Ф. Основы фотонного транспорта. – Киев: Техніка. 2008. – 680 с.
5. Бердников О.М., Щирий А.В. Напрямки збільшення швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 75...77.
6. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омеціньська О. Б. WDM під редакцією Катка В. Б. – Київ, 2005. – 194с.
7. Бердников О. М. Варіанти побудови мінімальної граничної дисперсії в оптичному волокні для багатохвильових систем передачі // Бердников О. М. Позняк А.А. Чіжмодій О.Я.// Сучасні інформаційні технології та кібербезпека (Київ 15-16 листопада) 2018. с. 98-99.
8. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. Київ: „Техніка”, 2001
9. Стеклов В.К., Нові інформаційні технології: Транспортні мережі телекомунікацій. Київ: «Техніка» 2004.
10. Корнійчук В.І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / В.І. Корнійчук, П.Д. Мосорін. – Одеса: Друк, 2001. – 363 с.
11. Варфоломеева О. Г. Методика розрахунку пропускної спроможності каналів системи управління телекомунікаційними мережами / О. Г. Варфоломеева, С. І. Мніщенко, О. І. Чумак // Достижения в телекоммуникациях

за 10 лет независимости Украины : сборник докладов V международной научно-практической конференции (Часть 1), Одесса, 21-22 августа 2001 г. – С. 79-80.

12. Поповський В. В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, В. Ф. Олійник та ін.]. – Харків : СМІТ, 2006. – 564 с.

13. Стеклов В. К. Оптимізація параметрів багатоканальних модемів / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман, О. І. Чумак // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2002. – №2. – С. 124-131.

14. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – Київ : Техніка, 2002. – 792 с.

15. Зюбіна Р. В. Широкосмугові бездротові технології / Р. В. Зюбіна, Ю. П. Бойко // Наукоємні технології: науково-технічна конференція студентів та молодих учених, 11–15 листопада 2013 р. — К. : НАУ, 2013. — С. 29.

16. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: навчальний посібник / Є.М. Чернихівський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 272 с.

17. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Полігенько О.О. Експериментальні дослідження пропускну здатності мереж стандарту IEEE 802.11n //Наукоємні технології. – 2013. – № 4 (20). – С.377-383.

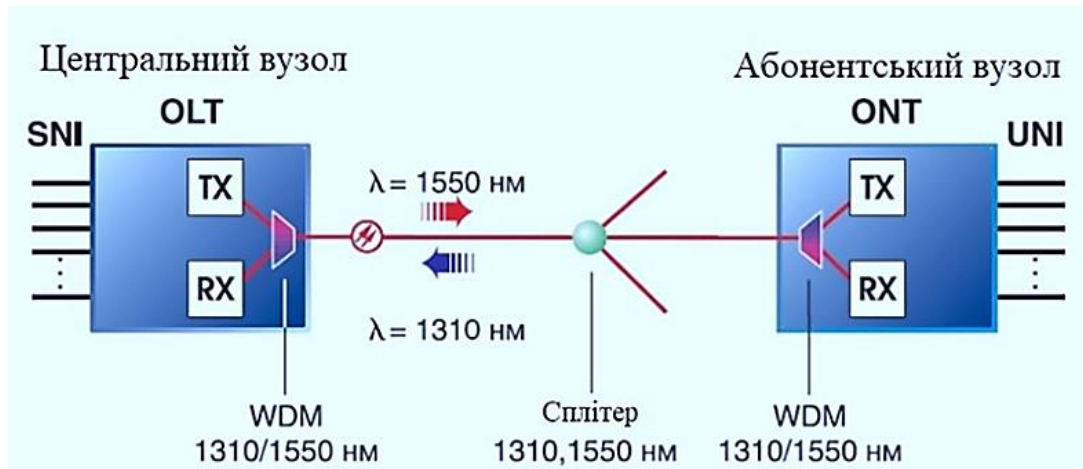
18. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології : підручник Частина 2, за загальною редакцією проф. В.В. Поповського - Х:ТОВ “Компанія СМІТ”, (Ч.2).–2010. – 470 с.

19. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт зі спеціальності “Телекомунікації та радіотехніка” (освітньо-професійна програма “Телекомунікації”) для студентів денної та заочної форм навчання / Уклад. Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський.– Вінниця : ВНТУ, 2018.– 50с.

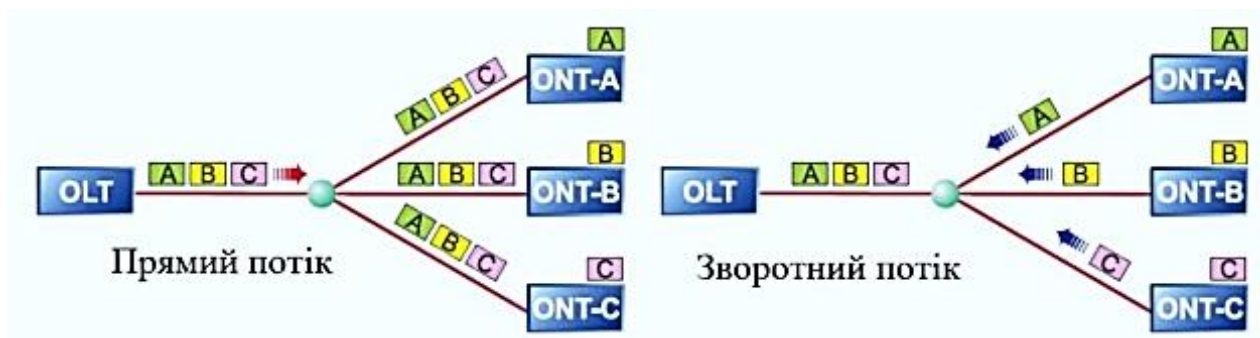
20. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

Додаток А
(обов'язковий)

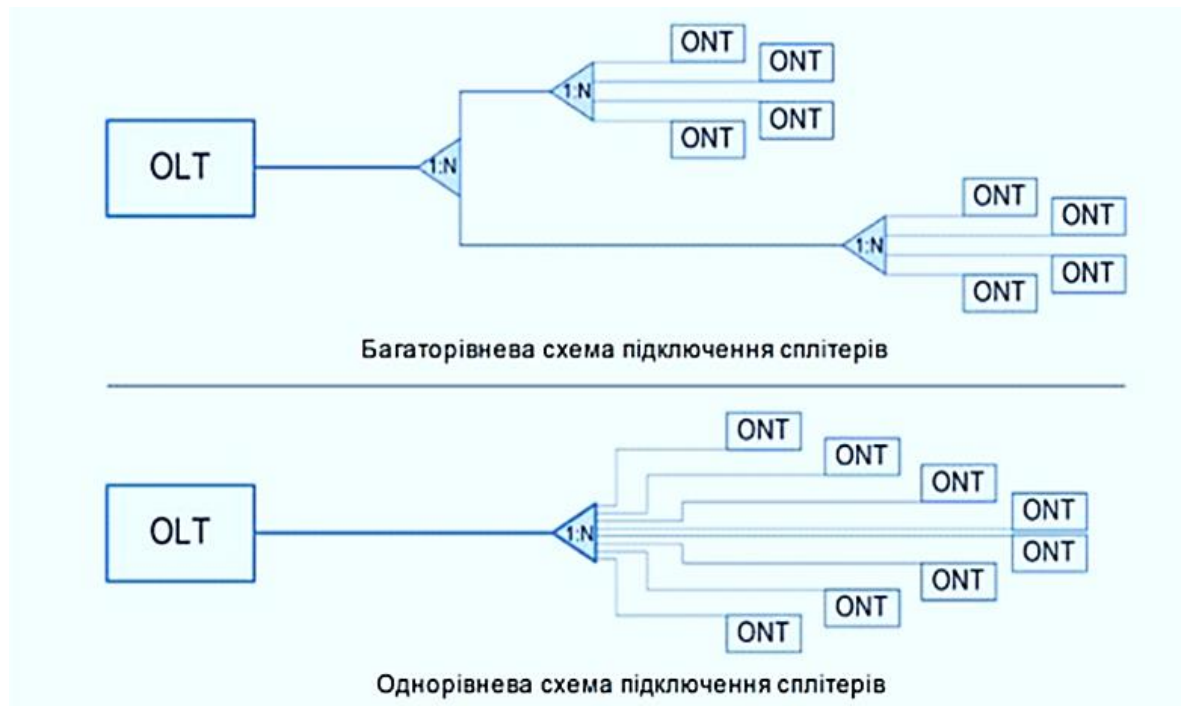
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ
В ПАСИВНІЙ ОПТИЧНІЙ МЕРЕЖІ
назва магістерської кваліфікаційної роботи



Структура та основні елементи мережі PON



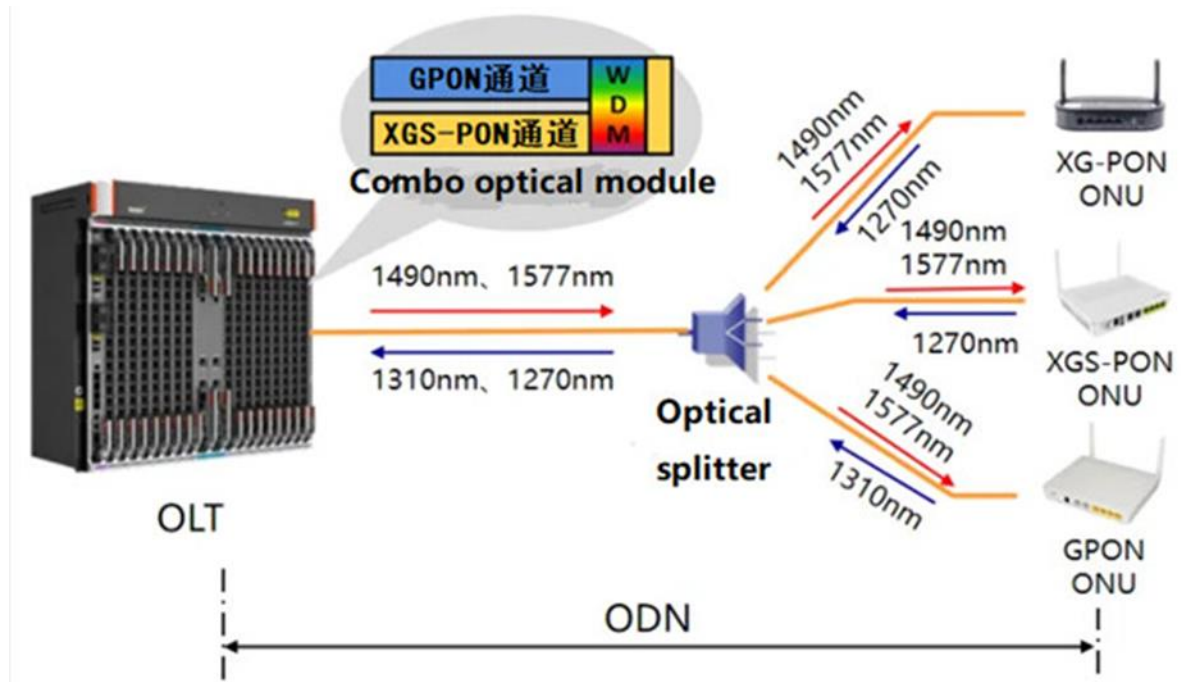
Технологія передачі низхідних та висхідних потоків у PON



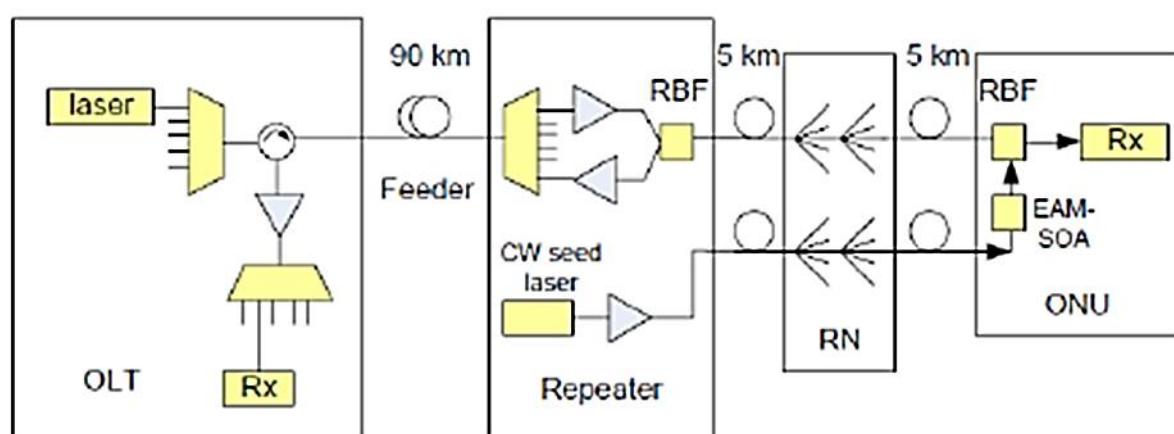
Схеми включення сплітерів у мережі PON

Основні характеристики стандартів PON

Технологія PON	BPON	EPON	GPON	XG-PON	NG-PON2
Максимальна кількість ONU на волокно	32	16	64; 128	32; 64 (128; 256)	≥ 256
Відстань, км	20	30(20)	20	20(40; 60)	≥ 60
Швидкість $\rightarrow/\leftarrow$, Гбіт/с	0,155/0,155 0,622/0,155 0,622/0,622	1/1	2,4/1,2 2,4/2,4	10/10; 2,5	$\frac{4}{\div 8}$ $\times (2,5; \frac{10}{2,5}; 10)$
Хвилі $\rightarrow/\leftarrow$, нм	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1310/1310)	1550/1310 (1480/1310)	1260-1280 1260-2800	DWDM

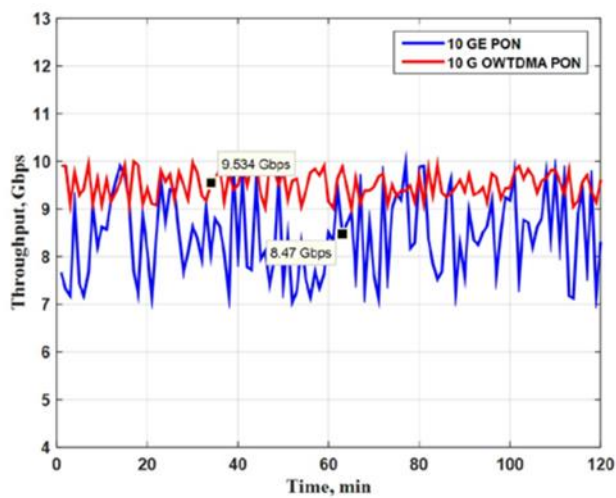


Структура взаємодії мережі при використанні комбінованого оптичного модуля

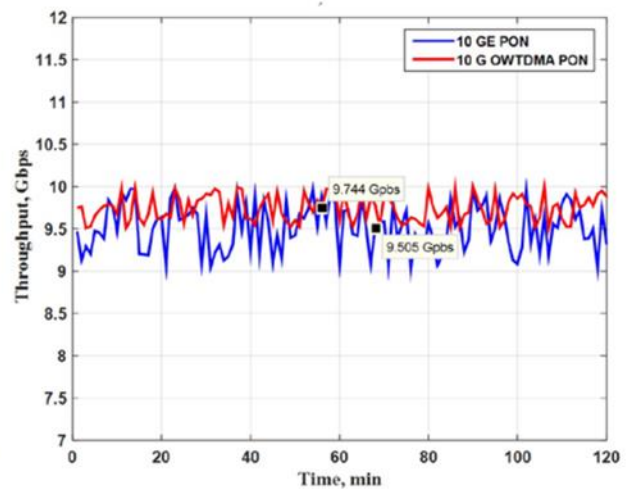


Архітектура DWDM Super-PON

Результати моделювання

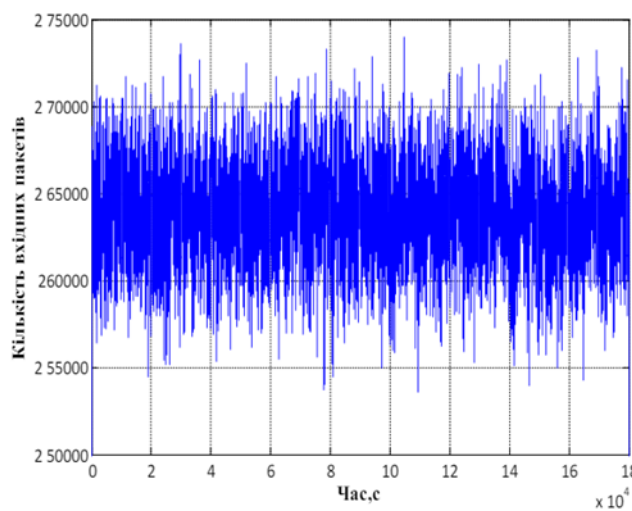


а)

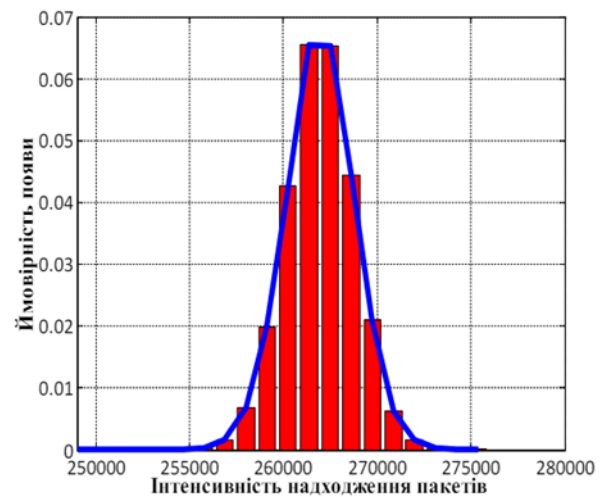


б)

Порівняння пропускної здатності запропонованої оптичної мережі з існуючими мережами 10 GE PON для висхідного каналу (а) та низхідного каналу (б)



а)



б)

Профіль (а) та щільність розподілу ймовірності (б) для дослідженого трафіку

Додаток Б

Протокол
перевірки кваліфікаційної роботи
на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

107

Назва роботи: Підвищення якості широкосмугового доступу в пасивній оптичній мережі

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС

Керівник Барась С. Т., к.т.н., професор

Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	72%
Загальна схожість	28%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор

(підпис)

Зонік К. А.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби) (підпис)

(прізвище, ініціали, посада)