

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
ДЕРЖАВНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
Циклова комісія комп'ютерних систем та мереж
(повна назва циклової комісії)

Допустити до захисту

Голова випускової циклової комісії
комп'ютерних систем та мереж

(повна назва циклової комісії)

(підпис)

Ірина КРАВЧУК

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

« 10 »

06

2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОГО СТУПЕНЯ
ФАХОВИЙ МОЛОДШИЙ БАКАЛАВР

Тема: «Технологія PON як основа для побудови ефективної мережі доступу»

Група: 321

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Здобувач освіти

Микита
(підпис)

Микита ПЛАНДОВСЬКИЙ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

Оксана
(підпис)

Оксана ОСАДЧА

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Консультант з оформлення
пояснювальної записки

Оксана
(підпис)

Оксана ОСАДЧА

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Кривий Ріг 2025 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
ДЕРЖАВНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АвіАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Відділення комп'ютерної та програмної інженерії
Циклова комісія комп'ютерних систем та мереж
Освітньо-професійний ступінь фаховий молодший бакалавр
Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова випускової циклової комісії
комп'ютерних систем та мереж

(повна назва циклової комісії)

Ірина КРАВЧУК

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«

10»

»

03

2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ОСВІТИ

Пландовському Микиті Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Технологія PON як основа для побудови ефективної мережі доступу»

Керівник роботи Осадча Оксана Георгіївна, викладач вищої категорії

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

затвержені наказом по коледжу від « 04 » 04 2025 року № 50-ст

2. Строк подання здобувачем освіти роботи з _____ по _____

3. Вихідні дані до роботи комплекс обґрунтованих рекомендацій та розроблений оптимальний підхід до проектування та реалізації сучасних мереж доступу для інтернет-провайдерів на базі технологій PON

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) проаналізувати роль, функції та сучасні виклики, що стоять перед інтернет-провайдерами у побудові мереж доступу; дослідити сучасні архітектури мереж доступу та виявити переваги технології PON у порівнянні з іншими рішеннями; здійснити детальний технічний порівняльний аналіз стандартів

GPON та XGS-PON; обґрунтувати та сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальної технології PON для проєктування сучасних мереж доступу

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

Презентація Microsoft PowerPoint

6. Консультанти розділів роботи (проєкту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Узгодження технічного завдання з керівником кваліфікаційної роботи	04.04.2025-07.04.2025	виконано
2	Підбір та вивчення науково-технічної літератури за темою кваліфікаційної роботи	08.04.2025-14.04.2025	виконано
3	Аналіз архітектур та технологій побудови мереж доступу	15.04.2025-21.04.2025	виконано
4	Опис загального принципу роботи технології PON та її ключових компонентів	22.04.2025-28.04.2025	виконано
5	Проектування мереж доступу GPON та XGS-PON: порівняльний аналіз та обґрунтування вибору	29.04.2025-02.05.2025	виконано
6	Написання та оформлення пояснювальної записки	12.05.2025-23.05.2025	виконано
7	Перевірка на плагіат пояснювальної записки	26.05.2025-30.05.2025	виконано
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи	02.06.2025-06.06.2025	виконано
9	Захист кваліфікаційної роботи		

Здобувач освіти

Бісєф
(підпис)

Микита ПЛАНДОВСЬКИЙ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

Осадча
(підпис)

Оксана ОСАДЧА

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Звіт подібності

метадані

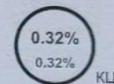
Назва організації
Ukrainian national aviation university
 Заголовок
Пландовський_321
 Автор Науковий керівник / Експерт
Пландовський Осадча О.
 підрозділ
Криворізький Фаховий коледж

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



25
 Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2



9647
 Кількість слів

71134
 Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про **МОЖЛИВІ** маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Тип спотворення	Символ	Кількість
Заміна букв	Ⓡ	10
Інтервали	A→	0
Мікропробіли	␣	24
Білі знаки	␣	0
Парафрази (SmartMarks)	a	40

Подібності за списком джерел

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз		Колір тексту
ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	ПТтакТ_2021_123_Федай 7/11/2024 Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)	174 1.80 %
2	ПТтакТ_2021_123_Федай 7/11/2024 Ukrainian national aviation university (Ukrainian national aviation university)	36 0.37 %

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Технологія *PON* як основа для побудови ефективної мережі доступу» містить: 58 сторінок, 14 рисунків, 9 таблиць, 18 використаних літературних джерел.

PON, *GPON*, *XGS-PON*, МЕРЕЖІ ДОСТУПУ, ІНТЕРНЕТ-ПРОВАЙДЕР, КАПІТАЛЬНІ ВИТРАТИ (*CAPEX*), ОПЕРАЦІЙНІ ВИТРАТИ (*OPEX*), СПІВІСНУВАННЯ (*COEXISTENCE*), МІГРАЦІЯ МЕРЕЖ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ОПТИЧНА ІНФРАСТРУКТУРА

Мета кваліфікаційної роботи полягає в обґрунтуванні оптимальних підходів до проектування сучасних мереж доступу на базі технологій *GPON* та *XGS-PON* для інтернет-провайдерів, а також формуванні рекомендацій щодо вибору та реалізації цих рішень з урахуванням технічних та економічних аспектів.

У роботі було проведено всебічний аналіз ролі інтернет-провайдерів та сучасних архітектур мереж доступу, підтверджено доцільність використання технології *PON* як найбільш перспективної. Здійснено детальний технічний та економічний порівняльний аналіз стандартів *GPON* та *XGS-PON*. Визначено, що, хоча *GPON* є економічно привабливим рішенням для поточних потреб, *XGS-PON* визнано стратегічно оптимальним для майбутніх розгортань завдяки симетричним швидкостям до 10 Гбіт/с та ключовій функції "співіснування" (*coexistence*) з *GPON*. Ця функція дозволяє гнучко здійснювати міграцію абонентів та послуг без повної заміни пасивної інфраструктури, що захищає інвестиції та забезпечує довгостроковий розвиток мережі.

5

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ДОСТУПУ	9
1.1 Інтернет-провайдери як суб'єкти побудови мереж доступу.....	9
1.1.1 Функції інтернет-провайдерів	9
1.1.2 Класифікація інтернет-провайдерів	10

1.2	Мережа доступу: визначення, функції та архітектура	11
1.3	Технології організації мереж доступу.....	14
1.3.1	Кабельні технології	14
1.3.2	Бездротові технології (радіозв'язок).....	16
1.4	Ринок фіксованого доступу в Україні: стан, динаміка, тенденції	17
1.4.1	Технологічна структура ринку фіксованого доступу.....	18
1.4.2	Аналіз абонентської бази за швидкісними сегментами	19
1.4.3	Регіональні особливості та виклики впровадження <i>PON</i>	20

РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЯ *PON*: АРХІТЕКТУРА, СТАНДАРТИ ТА ПРИНЦИП ФУНКЦІОНУВАННЯ..... 22 2.1

Концепція та переваги пасивних оптичних мереж (<i>PON</i>)	22 2.1.1
Загальне визначення та принцип функціонування <i>PON</i>	22 2.1.2 Базова архітектура мережі <i>PON</i>
архітектура мережі <i>PON</i>	22 2.2 Принципи передачі даних у мережах <i>PON</i>
передачі даних у мережах <i>PON</i>	24 2.2.1 Довжини хвиль та дуплексний режим
хвиль та дуплексний режим	25 2.2.2 Мультиплексування та множинний доступ
Мультиплексування та множинний доступ	25 2.3 Стандарти технології <i>PON</i>
Стандарти технології <i>PON</i>	27 2.3.1 Еволюція стандартів <i>PON</i>
Еволюція стандартів <i>PON</i>	28 2.3.2 <i>GPON</i> (<i>Gigabit Passive Optical Network</i>)
(<i>Gigabit Passive Optical Network</i>)	29 2.3.3 <i>XG-PON</i> та <i>XGS-PON</i> (<i>10-Gigabit Passive Optical Network</i>).....
(<i>10-Gigabit Passive Optical Network</i>).....	30 2.3.4 <i>NG-PON2</i> (<i>Next-Generation Passive Optical Network 2</i>)
(<i>Next-Generation Passive Optical Network 2</i>)	31 2.4 Порівняльний аналіз стандартів <i>PON</i>
Порівняльний аналіз стандартів <i>PON</i>	31

6

РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖ ДОСТУПУ *GPON* ТА *XGS-PON*: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ..... 34 3.1

Вихідні дані та загальні принципи проєктування	34 3.1.1
Опис досліджуваного району	34 3.1.2
Визначення потенційної абонентської бази та цільового відсотка проникнення	35 3.2 Проєктування мережі доступу на базі <i>GPON</i>
Проєктування мережі доступу на базі <i>GPON</i>	36 3.2.1 Особливості архітектури та топології для <i>GPON</i> в обраному районі
Особливості архітектури та топології для <i>GPON</i> в обраному районі	37 3.2.2 Розрахунок оптичного бюджету потужності для <i>GPON</i>
Розрахунок оптичного бюджету потужності для <i>GPON</i>	39 3.2.3 Вибір активного та пасивного обладнання <i>GPON</i>
Вибір активного та пасивного обладнання <i>GPON</i>	40 3.2.4 Попередня оцінка

вартості <i>GPON</i> -рішення	42	3.3	Проектування мережі
доступу на базі <i>XGS-PON</i>	44	3.3.1	Особливості архітектури
та топології для <i>XGS-PON</i> в обраному районі	44	3.3.2	Розрахунок оптичного бюджету
потужності для <i>XGS-PON</i>	46	3.3.3	Вибір активного та пасивного
обладнання <i>XGS-PON</i>	47	3.3.4	Попередня оцінка вартості <i>XGS-</i>
			<i>PON</i> -рішення
			49
3.4 Порівняльний аналіз варіантів реалізації та обґрунтування оптимального рішення	50		ВИСНОВКИ
.....	55		ПЕРЕЛІК
			ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....
			57
			7

ВСТУП

У сучасному світі доступ до високошвидкісного та надійного Інтернету є невід'ємною умовою функціонування суспільства та економіки. Експоненційне зростання обсягів споживаного трафіку, розвиток мультимедійних сервісів (4K/8K відео, віртуальна/доповнена реальність, хмарний геймінг) та поширення пристроїв Інтернету речей (*IoT*) висувають дедалі вищі вимоги до пропускну здатності та якості мереж доступу. Інтернет-провайдери (*ISP*) постійно стикаються з викликами щодо модернізації та масштабування своєї інфраструктури, адже від ефективності їхніх мереж безпосередньо залежить їхня конкурентоспроможність та здатність задовольняти потреби споживачів. У цьому контексті технології пасивних оптичних мереж (*PON*) стали домінуючим рішенням для побудови сучасних мереж доступу завдяки своїй високій пропускну здатності, економічності в експлуатації та значній масштабованості. Вибір оптимального стандарту *PON* – чи то *GPON* для поточних потреб, чи *XGS-PON* для майбутніх викликів – є критично важливим стратегічним рішенням, що обумовлює актуальність даного дослідження.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування оптимальних підходів до проектування сучасних мереж доступу на базі технологій *GPON* та *XGS-PON* для інтернет-провайдерів, а також формування рекомендацій щодо вибору та реалізації цих рішень з урахуванням технічних та економічних аспектів.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні **завдання**: -

проаналізувати роль, функції та сучасні виклики, що стоять перед інтернет-провайдерами у побудові мереж доступу;

- дослідити сучасні архітектури мереж доступу та виявити переваги технології *PON* у порівнянні з іншими рішеннями;

- описати загальний принцип роботи технології *PON* та її ключові компоненти;

- здійснити детальний технічний порівняльний аналіз стандартів *GPON* та *XGS-PON*;

8

- виконати економічний аналіз капітальних (*CAPEX*) та операційних (*OPEX*) витрат при розгортанні мереж на базі *GPON* та *XGS-PON*; - обґрунтувати та сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальної технології *PON* для проектування сучасних мереж доступу.

Об'єктом дослідження (проектування) є процеси проектування та розгортання оптичних мереж доступу інтернет-провайдерів.

Предметом дослідження (проектування) є підходи до вибору та реалізації технологій *Passive Optical Network (PON)*, зокрема *GPON* та *XGS-PON*, для побудови сучасних, масштабованих та економічно ефективних мереж доступу.

9

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР ТА ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

1.1 Інтернет-провайдери як суб'єкти побудови мереж доступу

Інтернет-провайдери (*Internet Service Providers, ISP*) — це суб'єкти господарювання, основна діяльність яких полягає у наданні доступу до глобальної мережі Інтернет кінцевим користувачам. Вони виступають посередниками між магістральними каналами зв'язку глобального масштабу та абонентами,

забезпечуючи маршрутизацію, передачу даних і доступ до електронних інформаційних ресурсів.

Провайдери є ключовими елементами інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури, оскільки саме вони створюють і обслуговують мережі доступу, впроваджують новітні технології передачі даних та підтримують необхідний рівень якості обслуговування.

1.1.1 Функції інтернет-провайдерів

Серед основних функцій, які виконують інтернет-провайдери, варто виокремити наступні [14]:

- підключення до глобальної мережі Інтернет із використанням різних технологій передачі даних (*xDSL, Ethernet*, оптоволоконні, бездротові тощо); - надання кінцевим користувачам *IP*-адрес, необхідних для маршрутизації трафіку та ідентифікації пристроїв у мережі;
 - організація маршрутизації трафіку між абонентами та глобальними сервісами, зокрема доступ до веб-сайтів, хмарних платформ, електронної пошти тощо;
 - забезпечення пропускної здатності згідно з умовами обраного тарифного плану;
- 10
- технічна підтримка користувачів, яка охоплює питання підключення, налаштування обладнання та вирішення технічних збоїв;
 - захист персональних даних і забезпечення мережевої безпеки, включаючи фільтрацію шкідливого трафіку, запобігання атакам і витокам інформації; - надання додаткових послуг, таких як *IP*-телебачення, інтернет-телефонія (*VoIP*), хостинг, реєстрація доменів тощо;
 - розвиток мережевої інфраструктури, модернізація технічних засобів та розширення зони покриття.

1.1.2 Класифікація інтернет-провайдерів

Інтернет-провайдери поділяються на кілька рівнів за типом і масштабом

взаємодії з іншими мережами. Загальноприйнятою є трирівнева модель [15]: -

Провайдери першого рівня (*Tier-1*) – це глобальні оператори, які володіють міжконтинентальними телекомунікаційними лініями та мають прямі зв'язки з іншими *Tier-1* мережами. Вони обмінюються трафіком безкоштовно (на умовах *settlement-free peering*) і забезпечують транзит для операторів нижчого рівня. Типовими клієнтами таких провайдерів є великі національні або регіональні телеком-компанії.

- Провайдери другого рівня (*Tier-2*) – це здебільшого національні чи регіональні оператори, які купують міжнародний трафік у *Tier-1* компаній, проте можуть також укласти пірингові угоди з іншими *Tier-2* або *Tier-3* провайдерами. Вони забезпечують магістральну інфраструктуру в межах країни або кількох країн.

- Провайдери третього рівня (*Tier-3*) – локальні оператори, основним завданням яких є підключення кінцевих користувачів (домогосподарств, офісів, підприємств) до мережі Інтернет. Вони зазвичай орендують ресурси в *Tier-2* провайдерів або беруть участь у точках обміну трафіком (*IXP*), де відбувається паритетний обмін даними між невеликими компаніями.

11

1.2 Мережа доступу: визначення, функції та архітектура

Мережа доступу (*Access Network*) — це частина телекомунікаційної системи, що забезпечує фізичне та логічне з'єднання кінцевого користувача з транспортною мережею провайдера (рисунок 1.1). Саме мережа доступу є проміжною ланкою між користувачем і інформаційними ресурсами глобального Інтернету, а тому її технічний стан, структура та технології безпосередньо впливають на якість послуг зв'язку [11].



Рисунок 1.1 – Мережа доступу у сучасній мережі зв'язку

Ця частина телекомунікаційної мережі (ТКМ) є однією з найскладніших, оскільки характеризується різноманіттям інтерфейсів та обладнання, різноманітністю топологій і середовищ передачі даних. Переглядаючи підходи до побудови МД, оператори ставлять перед собою кілька ключових цілей:

- утримання експлуатаційних витрат у прийнятних межах;
- уникнення необхідності побудови спеціалізованих мереж для кожного типу трафіку;
- забезпечення високої якості послуг, що задовольняє абонентів. На рисунку 1.2 схематично зображено типову будову мережі доступу з зазначенням всіх її основних ділянок та складових елементів, блоків та систем.

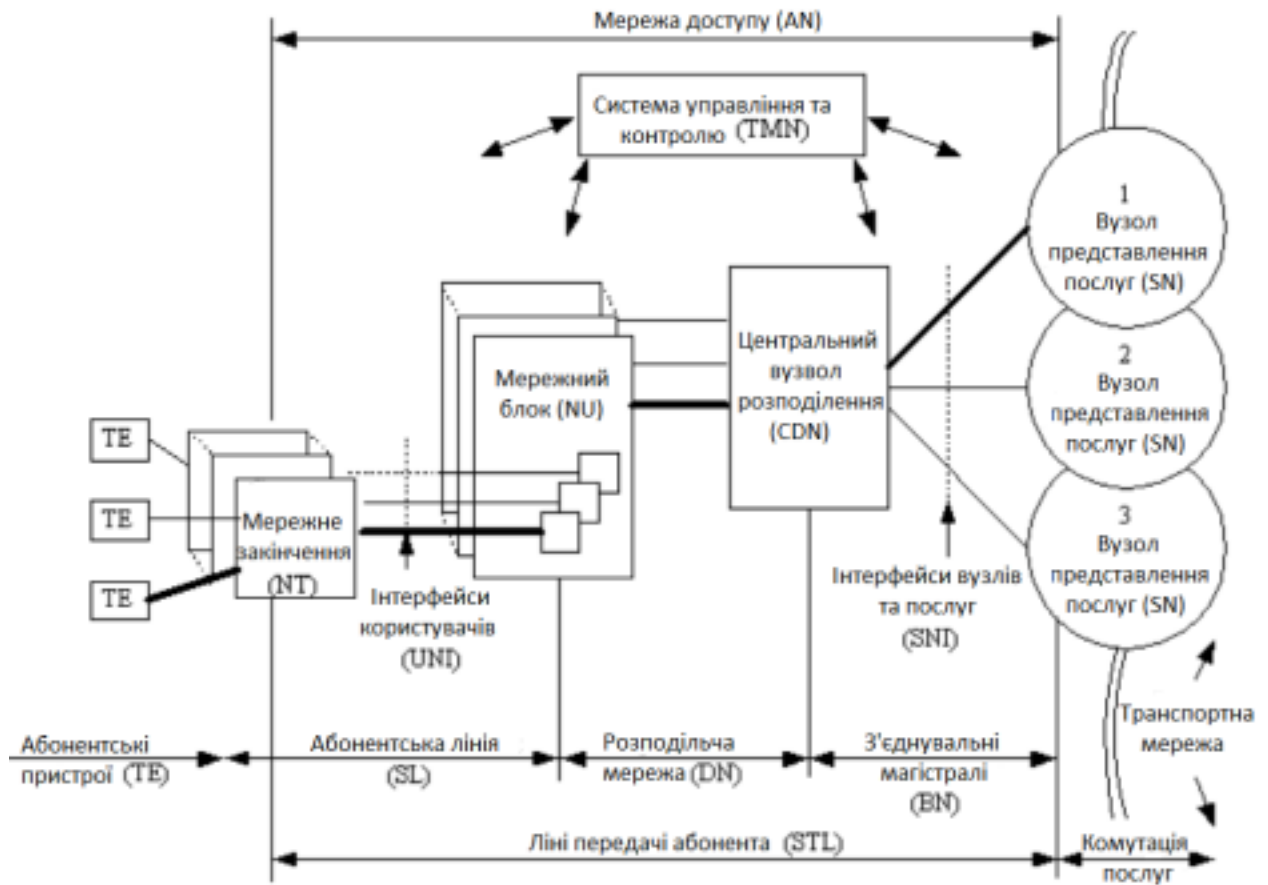


Рисунок 1.2 – Базова структура мережі доступу

Кожна з представлених на рисунку ділянок мережі доступу виконує специфічні функції для забезпечення зв'язку, а саме:

- *AN, Access Network* (Мережа доступу) – це сукупність абонентських ліній та обладнання (станцій) місцевої мережі, що забезпечують доступ абонентських терміналів до транспортної мережі, а також місцевий зв'язок без виходу на транспортну мережу.

- *CDN, Central Distribution Node* (Центральний розподільчий вузол) – це головна станція, яка забезпечує доступ абонентських пристроїв до вузлів надання різноманітних послуг (телефонного та документального зв'язку, Інтернету, телевізійного та радіомовлення, інтелектуальної мережі).

- *NU, Network Unit* (Мережевий блок) – це пристрій, що забезпечує первинний доступ через мультиплексування та концентрацію трафіку і каналів.

- *NT, Network Termination* (Мережеве закінчення) – це пристрій, який дозволяє підключити один або декілька кінцевих абонентських пристроїв (абонентських терміналів) до мережі доступу. При цьому абонентські термінали *TE (Termination Element)* встановлюються в приміщенні абонента та перебувають у його користуванні.

- *STL, Subscriber Transmission Line* (Абонентська лінія передачі) – з'єднує між собою вузол надання послуг (мережевий вузол) або мережеву станцію з кінцевим терміналом мережі та проходить через усю мережу доступу. Якщо *NT* та *TE* розділені, то абонентська лінія передачі починається від *TE*. Сучасна мережа доступу передбачає можливість використання різних проміжних пристроїв між *NT* або *TE* та вузлом надання послуг. Наприклад, пристрої мережевого об'єднання *NU*, які є пристроями первинного доступу, можуть бути представлені мультиплексорами, концентраторами або винесеними комутаторами.

- *TMN, Telecommunication Management Network* (Мережа управління телекомунікаціями). Для підтримання працездатності мережі доступу необхідна система управління та контролю, яка, як правило, будується на основі технології *TMN* – спеціальної мережі управління електрозв'язком. Ця мережа забезпечує управління мережею доступу та послугами шляхом організації взаємозв'язку з компонентами мережі доступу на основі єдиних інтерфейсів та протоколів, які стандартизовані Міжнародним Союзом Електрозв'язку (*ITU*).

- Вузол надання послуг *SN (Service Node)* забезпечує комутацію послуг для абонентів і виконує низку додаткових функцій: управління послугами, контроль наданих послуг, управління розрахунками, надання додаткових послуг тощо. Абонентська лінія передачі може бути умовно представлена наступними ділянками: абонентська лінія; розподільча абонентська мережа (або мережа переносу); з'єднувальні магістралі, які іноді називають транспортними. Кожен із цих ділянок може бути реалізований у різних фізичних середовищах. Ці лінії разом із різноманітним можливим електрозв'язку утворюють складну функціональну структуру мереж доступу та ускладнюють їх впровадження на основі існуючої мережі.

1.3 Технології організації мереж доступу

Усі технології доступу можна класифікувати за використовуваним середовищем передачі даних, що є фундаментальним критерієм їхньої архітектури та можливостей.

Технології широкопasmового абонентського доступу традиційно поділяються на дві основні категорії за типом фізичного середовища, що використовується для передачі даних: кабельні та радіозв'язок (рисунк 1.3).

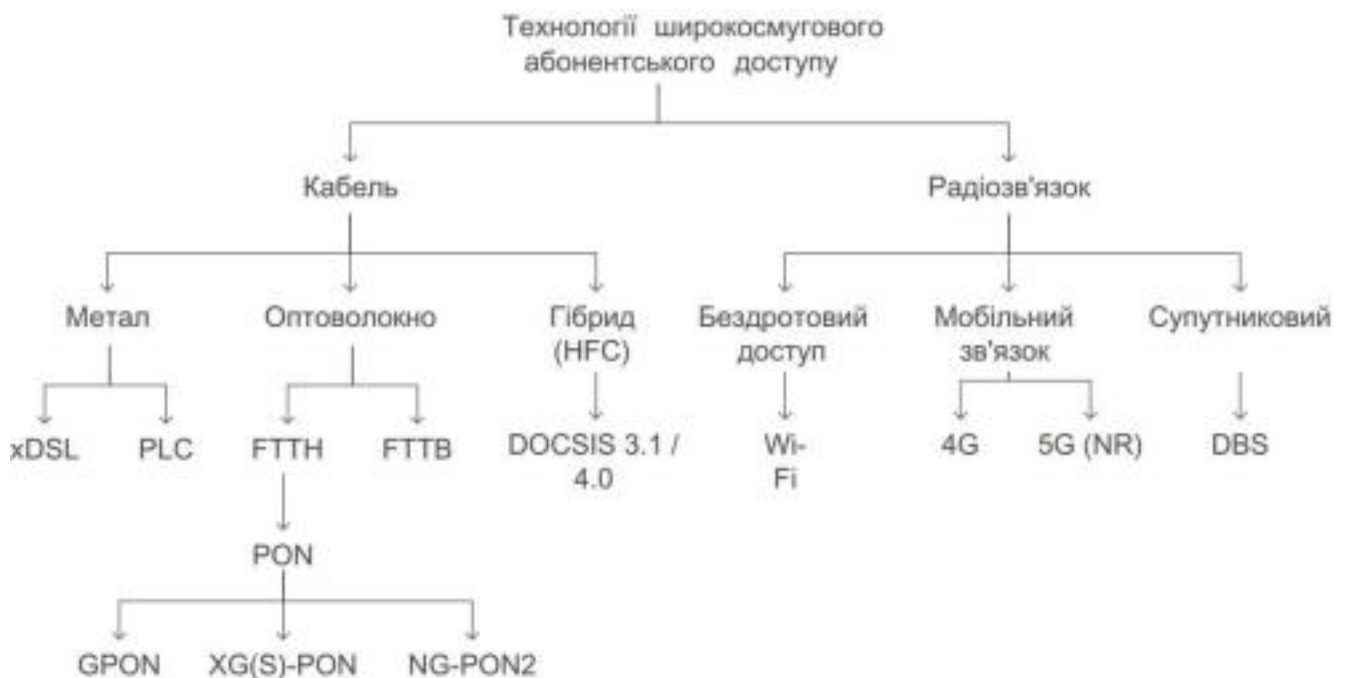


Рисунок 1.3 – Класифікація сучасних технологій доступу за типом фізичного середовища

1.3.1 Кабельні технології

Кабельні технології доступу використовують фізичні провідники для передачі даних. Вони характеризуються високою стабільністю та передбачуваністю якості сигналу.

На основі металевих провідників:

- *xDSL (Digital Subscriber Line)*: до цієї групи належить сімейство технологій (*ADSL, ADSL2/2+, VDSL, VDSL2*), які використовують існуючі мідні телефонні лінії

для високошвидкісної передачі даних. Перевагою є використання наявної інфраструктури, що знижує початкові інвестиції. Однак їхні можливості обмежені дальністю та якістю мідного кабелю, що призводить до зниження швидкості на великих відстанях. Швидкість *ADSL* сягає до 8 Мбіт/с у прямому каналі та 1 Мбіт/с у зворотному, тоді як *VDSL2* може забезпечувати до 100 Мбіт/с на коротких відстанях. В Україні, як і у світі, ці технології поступово витісняються оптичними рішеннями через зростаючі вимоги до пропускної здатності.

- *PLC (Power Line Communication)*: технологія передачі даних через електричні мережі. Хоча вона є перспективною для певних сценаріїв (наприклад, "розумний дім"), її поширення як основної технології абонентського доступу обмежене через потенційні перешкоди, нестабільність з'єднання та низьку пропускну здатність порівняно з оптичними технологіями.

На основі оптичних провідників (*FTTx*): ці технології є сучасним стандартом у побудові високошвидкісних мереж доступу завдяки неперевершеній пропускій здатності та надійності оптоволокна. *FTTx (Fiber To The x)* означає прокладання оптичного кабелю до певної точки «x» (рисунок 1.4) [18].

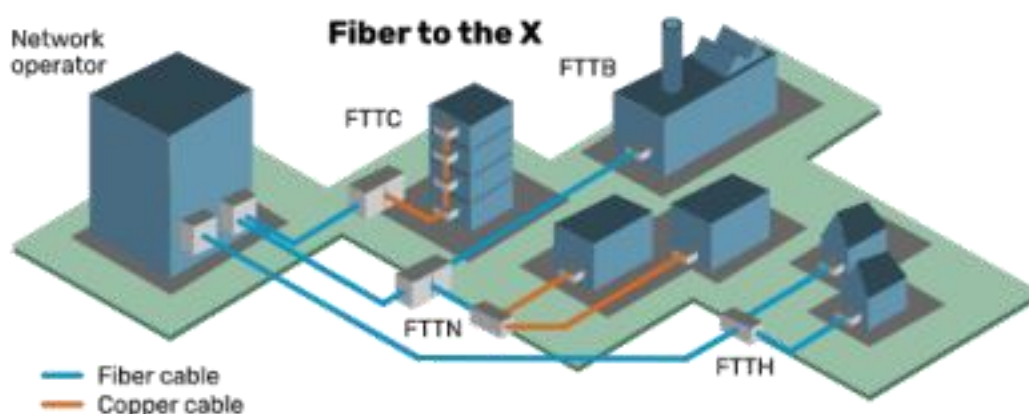


Рисунок 1.4 – Види архітектури, що входять до сімейства *FTTx*

FTTN (Fiber To The Node): Оптоволокно доходить до вузла (шафи), розташованого на відстані кількох кілометрів від кінцевого абонента. Далі абонент підключається мідним кабелем (наприклад, *xDSL*). Це є проміжним етапом модернізації мережі.

FTTC/FTTK (Fiber To The Curb/Kerb): Оптичний кабель доходить до

мікрорайону або групи будинків (шафа з обладнанням розташовується не далі ніж за 300 метрів від абонента). Кінцеве підключення здійснюється мідним кабелем.

FTTB (Fiber To The Building): Оптоволокну прокладається безпосередньо до будівлі, де встановлюється єдиний термінал (*ONU/комутатор*). Від нього до квартир або офісів абонентів прокладається кабель *Ethernet*. Ця архітектура набула широкого поширення, особливо у багатоквартирних будинках, завдяки своїй економічності та відносно високій пропускній здатності. Операційні витрати при експлуатації мережі *FTTB* зазвичай нижчі, ніж для інших мідних рішень, при цьому пропускна здатність є значно вищою.

FTTH (Fiber To The Home): Оптичне волокно доходить безпосередньо до квартири, приватного будинку або офісу абонента. Це найпередовіша та найперспективніша технологія, що забезпечує найвищу швидкість, надійність та відмовостійкість. Надійність *FTTH* обумовлена відсутністю проміжних активних вузлів (комутаторів) у під'їздах та вразливих до зовнішніх впливів мідних кабелів. Кожен абонент *FTTH* може отримати канал до 1 Гбіт/с або вище, що гарантує роботу будь-якого сучасного тарифного плану на максимальній швидкості.

PON (Passive Optical Network): У рамках *FTTH* пасивна оптична мережа (*PON*) є найпоширенішим та економічно ефективним рішенням. Вона використовує оптичні дільники, які дозволяють підключати безліч абонентів до одного оптичного волокна без використання активного обладнання між центральним офісом провайдера (*OLT - Optical Line Terminal*) та абонентськими пристроями (*ONU/ONT - Optical Network Unit/Terminal*).

1.3.2 Бездротові технології (радіозв'язок)

Бездротові технології забезпечують гнучкість розгортання та швидке підключення, особливо в умовах, де прокладка кабелів є дорогою або неможливою.

17

Wi-Fi: технологія бездротових локальних мереж (*WLAN*) на основі стандартів *IEEE 802.11* (наприклад, *802.11ax*, *802.11be* – *Wi-Fi 6/6E* та *Wi-Fi 7*). Широко використовується для внутрішньобудинкового та громадського доступу. Сучасні стандарти *Wi-Fi* пропонують значно вищі швидкості та кращу продуктивність у порівнянні з попередніми версіями. Популярними є також *Mesh*-мережі *Wi-Fi* для забезпечення рівномірного покриття.

Мобільний зв'язок:

- *4G (LTE)*: Забезпечує високошвидкісний мобільний інтернет, що конкурує з фіксованим доступом у багатьох регіонах.

- *5G (NR - New Radio)*: Нове покоління мобільного зв'язку, що пропонує значно вищі швидкості, менші затримки та можливість підключення великої кількості пристроїв (*IoT*). *5G* може стати серйозною альтернативою фіксованому доступу у деяких сценаріях.

Супутниковий зв'язок (*DBS - Direct Broadcast Satellite*) використовується для надання доступу до Інтернету в географічно віддалених або важкодоступних районах, де інші технології недоступні. Характеризується високими затримками та, як правило, обмеженою пропускнуою здатністю у зворотному каналі.

Інші бездротові технології. До цієї категорії можуть належати, наприклад, *WiMAX*, радіорелейні системи (для "останньої милі" у сільській місцевості або для корпоративних клієнтів), а також інші пропрієтарні бездротові рішення.

1.4 Ринок фіксованого доступу в Україні: стан, динаміка, тенденції

Ринок телекомунікацій України характеризується динамічним розвитком, що віддзеркалює глобальні тенденції зростання попиту на високошвидкісний доступ до Інтернету. Збільшення кількості абонентів фіксованого широкосмугового доступу свідчить про зростаючу залежність від стабільного та швидкого з'єднання. Ця тенденція є рушійною силою для модернізації та впровадження нових технологій мереж доступу.

18

1.4.1 Технологічна структура ринку фіксованого доступу

З технологічної точки зору, провідну позицію на ринку фіксованого доступу займають оптоволоконні лінії зв'язку, які охоплюють переважну більшість нових підключень (рисунок 1.5) [1].



Рисунок 1.5 – Структура розподілу ліній (точок) фіксованого доступу до мережі Інтернет в розрізі технологій (загальна кількість 8,06 млн од.)

Найактивніше зростання спостерігається у сегменті *PON*-технологій (пасивних оптичних мереж), які завдяки своїм технічним та економічним перевагам витісняють морально застарілі рішення, зокрема *ADSL*. Крім того, *PON* забезпечує високу енергоефективність і стабільність роботи мережі в умовах знеструмлень, що є критично важливим чинником для України в умовах енергетичних загроз.

19

1.4.2 Аналіз абонентської бази за швидкісними сегментами

Аналіз структури абонентської бази за швидкісними показниками чітко ілюструє пріоритет швидкості у сучасних мережах (рисунок 1.6) [1]. Наразі найбільшу кількість ліній фіксованого доступу складають:

- понад 4,2 млн одиниць – на швидкості від 30 до 100 Мбіт/с;
- понад 2,8 млн одиниць – на швидкості від 100 Мбіт/с до 1 Гбіт/с.

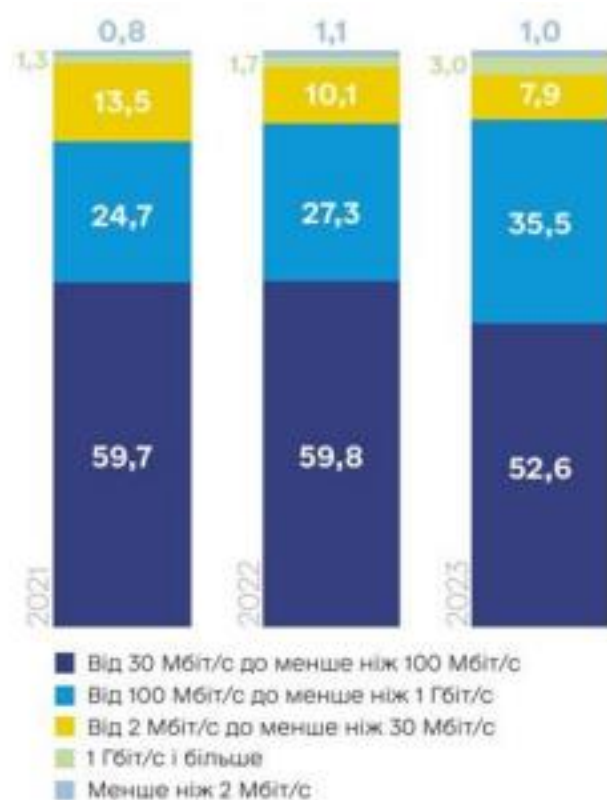


Рисунок 1.6 – Динаміка структури розподілу ліній (точок) фіксованого Інтернету в розрізі швидкості доступу за 2021-2023 роки (%)

Ці дані свідчать про те, що переважна більшість українських абонентів вже користується широкопasmовим доступом, що дозволяє комфортно працювати з більшістю сучасних онлайн-сервісів. Проте, найбільш показовим є стрімке зростання попиту на надшвидкісний доступ. Лінії зі швидкістю понад 1 Гбіт/с, хоча наразі й складають 3% від загальної кількості, демонструють вражаючий приріст на 75% за рік. Цей значний показник є яскравим підтвердженням того, що гігібітні швидкості стають дедалі затребуванішими, а фактори, пов'язані з пропускнуою

20

здатністю, відіграють ключову роль у стратегіях побудови та модернізації мереж доступу.

Такий інтенсивний ріст у сегменті надвисоких швидкостей прямо вказує на зміну споживчих переваг. Користувачі все частіше потребують значної пропускнуої здатності для таких ресурсоємних завдань, як хмарні обчислення, потокове відео у форматі 4K/8K, віртуальна (VR) та доповнена (AR) реальність, а також інтенсивна онлайн-гра. Ця тенденція безпосередньо стимулює операторів до подальшого

інвестування в оптичні технології доступу, зокрема *FTTH* на базі *PON*, які здатні забезпечити такі високі швидкості.

1.4.3 Регіональні особливості та виклики впровадження *PON* На рисунку нижче подано статистику впровадження технології *xPON* у різних регіонах України, що дає змогу проаналізувати як базовий рівень покриття, так і темпи приросту підключень у динаміці двох періодів: 2022–2023 (червоним) і 2023–2024 (II кв.) (жовтим) [13].

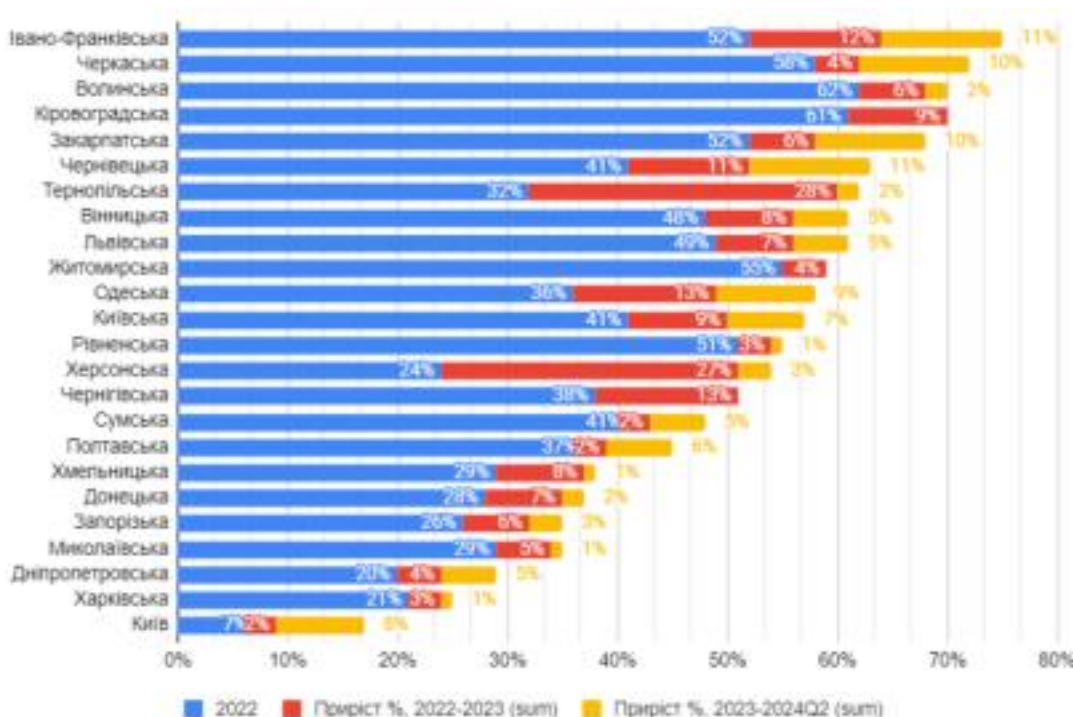


Рисунок 1.7 – Динаміка впровадження *xPON* у регіонах України (2022–2024, II кв.)

Дніпропетровська область, як один із найбільших індустріальних і урбанізованих регіонів України, має розгалужену телекомунікаційну інфраструктуру. Проте, згідно з аналізом динаміки впровадження технології *xPON*, регіон демонструє помірні темпи переходу до оптоволоконних архітектур доступу, порівняно з низкою інших областей.

Станом на 2022 рік лише 20% користувачів фіксованого Інтернету в області були підключені до мереж, побудованих на базі *PON*. Це досить скромний показник у порівнянні з лідерами, де рівень охоплення перевищував 50–60%. Протягом 2022–2023 років відбулося незначне зростання на 4%, а у першому півріччі 2024 року додатково — ще на 5%. Сумарний приріст за два роки становить 9%, що можна

вважати стабільним, але недостатньо динамічним з огляду на потенціал регіону.

Низький рівень початкового впровадження пояснюється кількома факторами:

- наявність великої кількості *FTTB*-мереж, побудованих у попередні роки, які досі експлуатуються;
- конкуренція між локальними провайдерами, які працюють на різних типах архітектур;
- фінансові обмеження у мікропровайдерів, які не мають змоги масово інвестувати в дорогі оптичні лінії;
- складність перепідключення в густонаселених районах, де інфраструктура забудови не завжди дозволяє просто замінити кабелі. Водночас позитивною тенденцією є те, що темпи приросту у 2023–2024 роках перевищують попередні значення, що свідчить про нарощування зусиль провайдерів у напрямку модернізації. Активізація впровадження *PON* саме в останній рік може бути зумовлена:
- потребою підвищити енергоефективність мереж на тлі регулярних знеструмлень;
- зростанням попиту на стабільний і високошвидкісний інтернет серед населення;
- поступовим моральним і фізичним зношенням *FTTB*-мереж на основі мідного кабелю.

22

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЯ *PON*: АРХІТЕКТУРА, СТАНДАРТИ ТА ПРИНЦИП ФУНКЦІОНУВАННЯ

2.1 Концепція та переваги пасивних оптичних мереж (*PON*)

Пасивні оптичні мережі (*PON*) — це основа більшості сучасних архітектур *FTTH* (*Fiber to the Home*) завдяки своїм технічним і економічним перевагам. Вона забезпечує гігабітні швидкості передачі, має високу масштабованість, дозволяє обслуговувати велику кількість абонентів без застосування активного обладнання між провайдером і користувачем, що істотно знижує витрати на побудову та

обслуговування мережі.

2.1.1 Загальне визначення та принцип функціонування *PON* – це телекомунікаційна мережа, яка використовує оптичне волокно як середовище передачі даних та виключно пасивні оптичні компоненти (оптичні дільники/сплітери) у розподільчій мережі між центральним офісом провайдера та приміщенням абонента. Ключовою особливістю *PON* є відсутність активного мережевого обладнання (такого як комутатори, підсилювачі або повторювачі) на ділянці між оптичним лінійним терміналом (*OLT*) у центральному офісі та оптичним мережевим терміналом (*ONT/ONU*) на стороні абонента. Це кардинально відрізняє *PON* від активних оптичних мереж (*AON*), де кожен абонент підключається до виділеного порту активного обладнання.

2.1.2 Базова архітектура мережі *PON*

На рисунку 2.1 представлена типова архітектура мережі *PON*, що ілюструє взаємодію її ключових компонентів та принцип прокладання оптичного волокна від центрального вузла до абонентів [16].

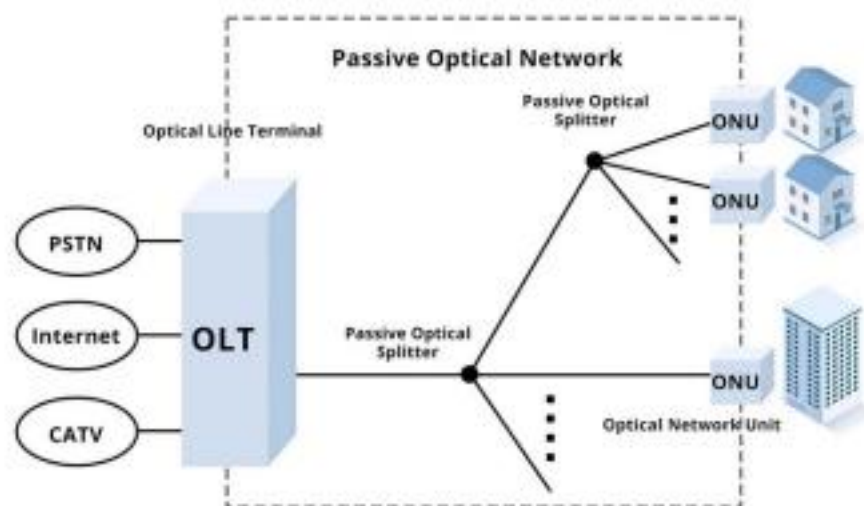


Рисунок 2.1 – Типова архітектура мережі *PON*

Як видно з рисунку 2.1, типова архітектура мережі *PON* складається з трьох основних компонентів, що взаємодіють для забезпечення повного спектру телекомунікаційних послуг [12]:

- *OLT (Optical Line Terminal)* – Оптичний лінійний термінал: розташований у центральному офісі провайдера, *OLT* є центральним елементом мережі *PON*. Його основні функції включають:

- агрегацію трафіку від транспортної мережі провайдера (наприклад, Інтернет, *IPTV*, *VoIP*) та його перетворення в оптичний сигнал для передачі в абонентську мережу;
- мультиплексування даних для багатьох абонентів в один оптичний потік;
- управління абонентськими пристроями *ONT/ONU*, включаючи їхнє налаштування, моніторинг стану та розподіл смуги пропускання;
- реалізацію протоколів доступу для забезпечення ефективної та безконфліктної передачі даних у зворотному напрямку.

- *ODN (Optical Distribution Network)* – Оптична розподільча мережа: це пасивна частина мережі *PON*, яка з'єднує *OLT* з абонентськими *ONT/ONU*. Вона складається з:

24

- оптоволоконних кабелів, які забезпечують передачу оптичного сигналу на значні відстані без істотних втрат;
- оптичних сплітерів (дільників) – пасивні пристрої, які розгалужують один вхідний оптичний сигнал від *OLT* на декілька вихідних сигналів для *ONT/ONU* (у прямому напрямку) і, навпаки, об'єднують сигнали від декількох *ONT/ONU* в один потік до *OLT* (у зворотному напрямку). Коефіцієнт розділення сплітерів (наприклад, 1:32, 1:64 або 1:128) визначає кількість абонентів, які можуть бути підключені до одного порту *OLT*. *ODN* не потребує електроживлення та активних пристроїв, що значно підвищує надійність та знижує експлуатаційні витрати.

- *ONT/ONU* (*Optical Network Terminal/Unit*) – Оптичний мережевий термінал/блок: це абонентський пристрій, розташований на боці кінцевого користувача (в квартирі, приватному будинку або будівлі). Функції *ONT/ONU* включають:

- прийом оптичного сигналу від сплітера та виділення з нього даних, призначених для конкретного абонента;
- перетворення оптичного сигналу в електричний для підключення кінцевих пристроїв (комп'ютерів, телефонів, маршрутизаторів тощо); · інкапсуляція даних абонента та передача їх в оптичному форматі до *OLT* у виділені часові слоти;
- Забезпечення інтерфейсів для абонентських пристроїв (*Ethernet*-порти, телефонні порти *FXS*, *Wi-Fi*).

2.2 Принципи передачі даних у мережах *PON*

Ефективність функціонування пасивних оптичних мереж (*PON*) значною мірою забезпечується за рахунок продуманих механізмів передачі даних, які дозволяють оптимально використовувати єдине оптичне волокно для взаємодії між оптичним лінійним терміналом (*OLT*) та численними абонентськими оптичними мережевими терміналами (*ONT/ONU*). Ці механізми включають мультиплексування за довжиною хвилі, а також часове мультиплексування для

25

прямого каналу та множинний доступ з часовим розділенням для зворотного каналу.

2.2.1 Довжини хвиль та дуплексний режим

Для забезпечення двосторонньої передачі інформації по одному оптичному волокну в мережах *PON* застосовується технологія спектрального мультиплексування за довжиною хвилі (*WDM – Wavelength Division Multiplexing*). Цей принцип полягає у використанні різних довжин хвиль світла для прямого (від

OLT до *ONT/ONU*) та зворотного (від *ONT/ONU* до *OLT*) потоків даних. Такий підхід дозволяє одночасно передавати інформацію в обох напрямках без взаємних перешкод, ефективно використовуючи пропускну здатність волокна.

Як правило, для передачі потоку інформації від *OLT* до *ONT/ONU*, що називається прямим потоком (*Downstream*), використовується довжина хвилі 1490 нм. В окремих випадках, особливо для трансляції відеопослуг або спеціалізованих додатків, може використовуватися додаткова довжина хвилі 1550 нм. Натомість, потоки даних від різних абонентських вузлів у центральний вузол, що утворюють зворотний потік (*Upstream*), передаються на довжині хвилі 1310 нм. Для реалізації цього функціоналу як в *OLT*, так і в *ONT/ONU* вбудовані спеціалізовані мультиплектори *WDM*, які відповідають за розділення та об'єднання цих різних оптичних потоків. Число абонентських вузлів, підключених до одного приймально-передавального модуля *OLT*, може бути значним, оскільки воно обмежується бюджетом потужності оптичного сигналу та максимальною швидкістю приймально-передавальної апаратури, а не фізичним розділенням волокон.

2.2.2 Мультиплексування та множинний доступ

Передача даних у прямому та зворотному напрямках у мережах *PON* реалізується за допомогою різних механізмів мультиплексування для оптимізації використання смуги пропускання та уникнення колізій.

Прямий потік (*Downstream*) – часове мультиплексування (*TDM*). Прямий потік на рівні оптичних сигналів є ширококомовним (*broadcast*). Це означає, що дані

26

від *OLT* передаються по оптичному волокну до всіх підключених *ONT/ONU*. Кожен абонентський вузол *ONT*, отримуючи цей загальний потік, здійснює часове мультиплексування (*Time Division Multiplexing, TDM*). Це означає, що *OLT* передає дані для різних *ONT* послідовно у часі, і кожен *ONT/ONU*, зчитуючи адресні поля, виділяє з цього загального потоку лише ту частину інформації, яка призначена безпосередньо для нього (рисунок 2.2) [2]. Цей процес можна порівняти з роботою розподільного демультіплексора. Завдяки використанню криптографічних алгоритмів, що є невід'ємною частиною стандартів *PON*, забезпечується високий рівень конфіденційності та захисту даних, незважаючи на ширококомовну розсилку.

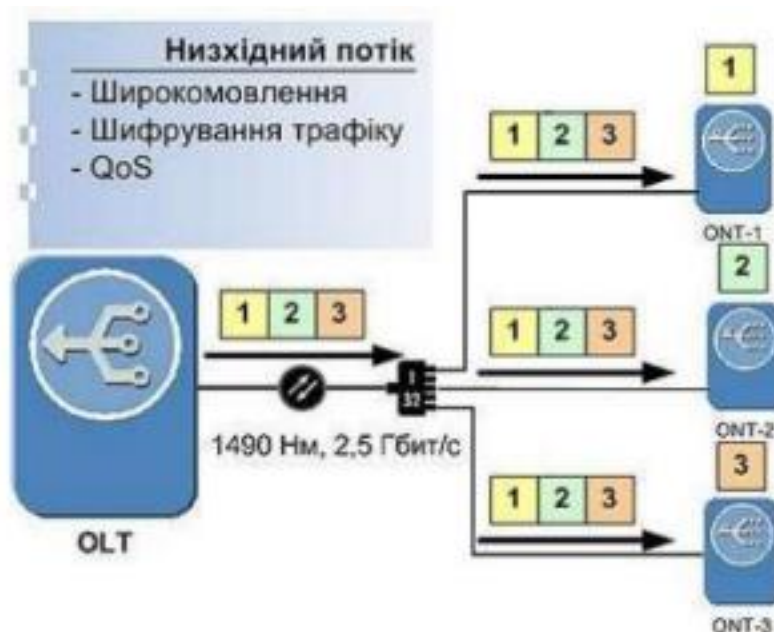


Рисунок 2.2 – Принцип передачі прямого потоку в мережі *PON (TDM)*

Зворотний потік (*Upstream*) – Множинний доступ з часовим розділенням (*TDMA*). Усі абонентські вузли *ONT/ONU* ведуть передачу в зворотному потоці на одній і тій же довжині хвилі (1310 нм). Для уникнення колізій, що виникли б при одночасній передачі, використовується концепція множинного доступу з часовим розділенням (*TDMA – Time Division Multiple Access*). *OLT* виступає як центральний контролер, який динамічно розподіляє часові слоти для передачі даних між різними *ONT/ONU*. Це забезпечується за допомогою протоколів управління, що функціонують між *OLT* та абонентськими пристроями. Кожен *ONT/ONU* може

27

передавати свої дані лише у призначений йому часовий інтервал, що гарантує безконфліктну передачу інформації від абонентів до центрального вузла (рисунок 2.3) [2].

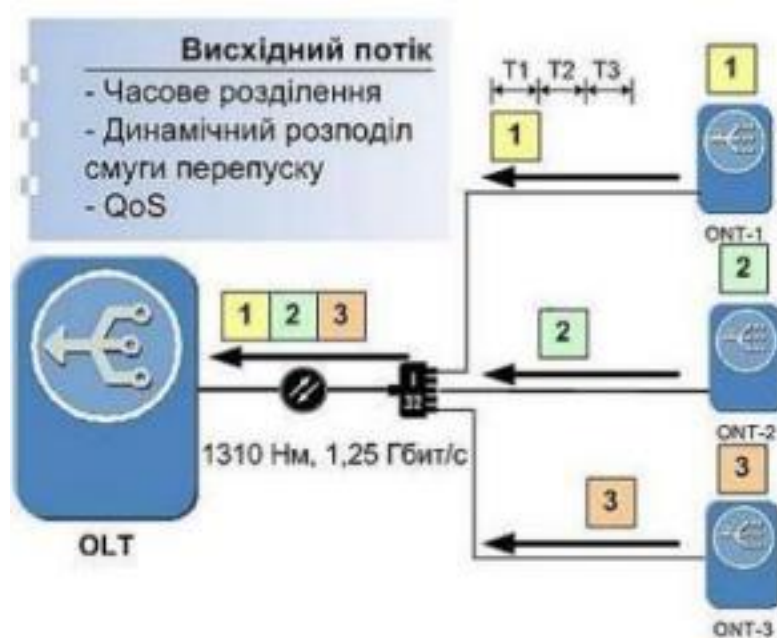


Рисунок 2.3 – Принцип передачі зворотного потоку в мережі *PON* (TDMA)

Крім того, в мережах *PON* застосовується механізм динамічного розподілу смуги пропускання (*DBA – Dynamic Bandwidth Allocation*). *OLT* постійно моніторить потреби кожного *ONT/ONU* в смугі пропускання та динамічно виділяє їм часові слоти у висхідному напрямку. Це дозволяє ефективно використовувати доступну смугу пропускання, надаючи її тим абонентам, які мають більшу потребу в даний момент, тим самим оптимізуючи загальну продуктивність мережі та забезпечуючи задовільну якість послуг для всіх користувачів.

2.3 Стандарти технології *PON*

Еволюція технології *PON* тісно пов'язана зі зростаючими вимогами до пропускної здатності та функціональності мереж доступу. Початкові розробки, спрямовані на використання переваг оптоволокна, поступово трансформувалися в серію міжнародних стандартів, які визначають архітектуру, протоколи та

характеристики обладнання *PON*. Ці стандарти розробляються та підтримуються Міжнародним союзом електрозв'язку (*ITU-T*) та Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (*IEEE*), забезпечуючи інтероперабельність та широке впровадження.

2.3.1 Еволюція стандартів *PON*

Еволюція технологій *PON* є постійним процесом, що відображає зростання вимог до пропускну здатності та функціональності мереж доступу. Історія розвитку та основні етапи еволюції стандартів *PON* представлені на рисунку 2.4 [17].

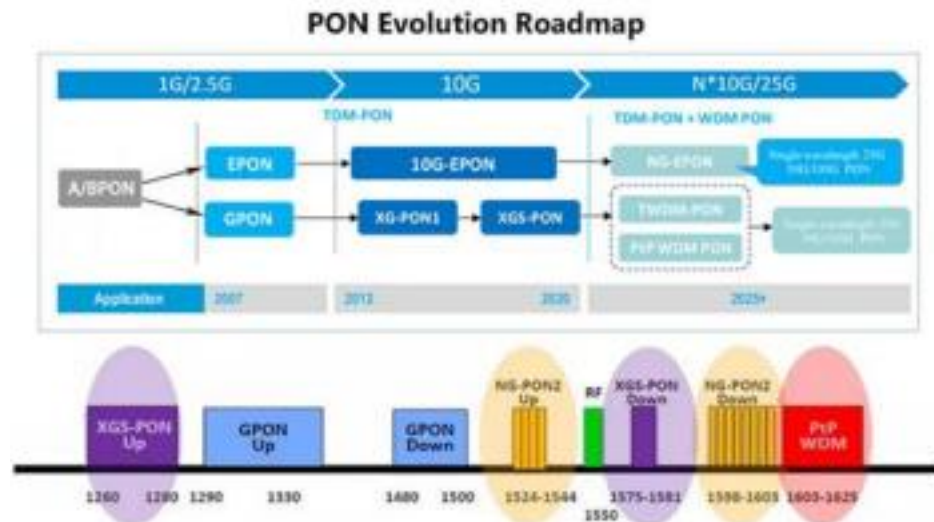


Рисунок 2.4 – Еволюція стандартів *PON*

Початкові розробки *PON* розпочалися ще у 1990-х роках. Першими значущими стандартами були *APON* (*ATM Passive Optical Network*), заснований на технології асинхронного режиму передачі (*ATM*), та його доопрацьована версія *BPON* (*Broadband Passive Optical Network*). Хоча ці стандарти заклали основу для подальшого розвитку *PON*, їхні швидкості (до 622 Мбіт/с) та орієнтація на *ATM* технологію, яка згодом поступилася місцем *IP*, обмежували їхнє широке комерційне застосування. Проте, саме вони довели життєздатність концепції пасивних оптичних мереж та їхню економічну ефективність.

29

З поширенням послуг на базі протоколу *IP* та зростанням популярності *Ethernet*, виникла потреба у нових стандартах *PON*, які були б краще адаптовані до цих технологій. Це призвело до розробки *GPON* та *EPON*, які стали домінуючими стандартами "першого покоління" широкосмугових *PON*. Подальше експоненціальне зростання трафіку, зумовлене поширенням потокового відео високої роздільної здатності, хмарних сервісів та *IoT*-пристроїв, стимулювало розвиток "другого покоління" – 10-гігабітних *PON*-стандартів (*XG-PON*, *XGS*

PON). Наразі активно розробляються та впроваджуються рішення "третього покоління" (*NG-PON2*) та навіть вищі швидкості (*25G/50G/100G PON*), що відображає безперервний попит на підвищення пропускної здатності.

2.3.2 GPON (Gigabit Passive Optical Network)

GPON (*G.984* серія рекомендацій *ITU-T*) є на сьогодні найпоширенішим та найбільш зрілим стандартом пасивних оптичних мереж у світі, що забезпечує гігабітні швидкості доступу. Його ключові характеристики:

- Швидкість передачі даних. *GPON* забезпечує асиметричні швидкості: до 2.488 Гбіт/с у прямому каналі (*downstream*) та до 1.244 Гбіт/с у зворотному каналі (*upstream*). Ця асиметрія відповідає типовим потребам користувачів, де об'єм завантаженого трафіку значно перевищує об'єм передаваного.

- Довжини хвиль. Для прямого каналу використовується довжина хвилі 1490 нм, для зворотного – 1310 нм. Опціонально може бути використана довжина хвилі 1550 нм для трансляції відео.

- Співвідношення поділу. Стандарт *GPON* підтримує різні коефіцієнти оптичного поділу, типовими є 1:32 або 1:64. Це означає, що один порт *OLT* може обслуговувати до 32 або 64 абонентів відповідно.

- Максимальна дальність. Ефективна дальність передачі може досягати 20 км.

- Протокол інкапсуляції. *GPON* використовує власний, високоефективний протокол *GEM (GPON Encapsulation Method)*. *GEM* дозволяє інкапсулювати різні типи трафіку, включаючи *Ethernet*, *TDM* (для телефонного зв'язку) та *ATM*,

30

забезпечуючи гнучкість та підтримку мультисервісних додатків. Це робить *GPON* універсальним рішенням для надання Інтернету, *IPTV* та *VoIP*. - Переваги та застосування. Завдяки високій пропускній здатності, ефективності та зрілості технології, *GPON* став де-факто стандартом для широкомасштабного розгортання *FTTH* у багатоквартирних та приватних будинках по всьому світу.

2.3.3 XG-PON та XGS-PON (10-Gigabit Passive Optical Network) Зі зростанням

попиту на ще вищі швидкості, зокрема для корпоративних клієнтів, високоємних баз даних, центрів обробки даних (ЦОД) та *5G backhaul*, виникла потреба у 10-гігабітних версіях *PON*. Ці стандарти також визначаються рекомендаціями *ITU-T* (*G.987* серія):

- *XG-PON* (*10 Gigabit-capable Passive Optical Network*): Забезпечує асиметричні швидкості: до 9.953 Гбіт/с у прямому каналі (*downstream*) та до 2.488 Гбіт/с у зворотному каналі (*upstream*). Це є прямим еволюційним кроком від *GPON*, зберігаючи аналогічну асиметрію, але на порядок вищих швидкостях.

- *XGS-PON* (*10 Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network*): Представляє собою розвиток *XG-PON*, пропонуючи симетричні швидкості до 9.953 Гбіт/с як у прямому, так і у зворотному каналі. Це є надзвичайно важливим для додатків, що вимагають високої симетричної пропускної здатності, таких як хмарні сервіси, передача великих файлів, відеоконференції високої роздільної здатності та послуги для бізнесу.

XG-PON та *XGS-PON* використовують інші довжини хвиль, ніж *GPON* (наприклад, 1577 нм для *downstream* та 1270 нм для *upstream*), що дозволяє їх співіснування (*coexistence*) на одному і тому ж оптичному волокні за допомогою *WDM*-сплітерів. Це дає операторам можливість поступово модернізувати свою мережу, не перериваючи надання послуг існуючим абонентам *GPON*.

Ці стандарти стають основою для надання преміум-послуг, підключення великих підприємств, забезпечення транспортних мереж для базових станцій

31

мобільного зв'язку (наприклад, *5G*), а також для сценаріїв фіксованого бездротового доступу (*FWA*).

2.3.4 NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2)

NG-PON2 (*G.989* серія рекомендацій *ITU-T*) є подальшим кроком у розвитку *PON*, призначеним для задоволення потреб у пропускній здатності, що виходять за межі 10 Гбіт/с.

На відміну від попередніх стандартів, *NG-PON2* використовує мультиплексування не лише у часовій, а й у спектральній області (*Time and Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network – TWDM-PON*). Це дозволяє агрегувати декілька пар довжин хвиль (наприклад, 4 пари по 10 Гбіт/с), що

забезпечує сумарну пропускну здатність до 40 Гбіт/с (4x10 Гбіт/с) на одному волокні.

NG-PON2 надає високу гнучкість у розподілі пропускну здатності, можливість динамічного перемикавання абонентів між довжинами хвиль та покращені механізми резервування. Це робить його ідеальним для підтримки конвергентних мереж, що об'єднують фіксований, мобільний та бізнес-доступ.

NG-PON2 є перспективним рішенням для високоємних магістральних мереж доступу, великих корпоративних клієнтів, *Cloud-RAN (Radio Access Network)* для 5G та сценаріїв, що вимагають надвисоких швидкостей та низьких затримок.

2.4 Порівняльний аналіз стандартів *PON*

Вибір оптимального стандарту *PON* для розгортання мережі доступу є критично важливим рішенням для операторів, оскільки він впливає на початкові капітальні витрати, експлуатаційні витрати, масштабованість мережі та можливість надання майбутніх послуг. Кожен зі стандартів *PON* має свої унікальні характеристики, які роблять його більш або менш придатним для конкретних сценаріїв. У таблиці 2.1 представлено ключові технічні та економічні показники основних стандартів *PON*.

32

Таблиця 2.1 – Порівняння основних стандартів *PON*

Ключові характеристики	Стандарт				
	<i>GPON</i>	<i>XG-PON</i>	<i>XGS-PON</i>	<i>NG-PON2</i>	<i>PtP WDM PON</i>
<i>Downstream</i>	2.5 Гбіт/с	10 Гбіт/с	10 Гбіт/с	до 40 Гбіт/с	до 100 Гбіт/с
<i>Upstream</i>	1.25 Гбіт/с	2.5 Гбіт/с	10 Гбіт/с	до 10 Гбіт/с	до 100 Гбіт/с
Множинний доступ	<i>TDM</i>	<i>TDM</i>	<i>TDM</i>	<i>TWDM</i>	Виділений канал
Технологія	<i>ITU-T G.984</i>	<i>ITU-T G.987</i>	<i>ITU-T G.9807.1</i>	<i>ITU-T G.989</i>	<i>WDM</i>
Сумісність з <i>GPON</i>	—	Так	Так	Так	Обмежено
Дальність (км)	до 20	до 20	до 20	до 40	до 60

Абонентів/порт <i>OLT</i>	до 32/64	до 128	до 128	до 128	1:1
Орієнтовна вартість реалізації	1× (базова вартість)	1.5× – 2.5×	2× – 3×	3× – 5× і вище	5× – 8× (найдорожче рішення)

Аналіз ключових параметрів стандартів *PON*, таких як пропускна здатність, множинний доступ, сумісність та орієнтовна вартість реалізації, чітко показує, що оптимальними технологіями для проектування сучасних мереж доступу є *GPON* та *XGS-PON*:

- *GPON* є ідеальною відправною точкою для провайдерів, які прагнуть забезпечити широкопasmовий доступ з мінімальними початковими інвестиціями. Завдяки базовій вартості реалізації (1×) та достатній для поточних масових потреб асиметричній швидкості (2.5 Гбіт/с *Downstream* / 1.25 Гбіт/с *Upstream*), *GPON* дозволяє швидко розгорнути мережу та залучити значну абонентську базу.

- *XGS-PON* виступає як стратегічно важливе рішення для забезпечення майбутньої готовності мережі. Пропонуючи симетричні швидкості до 10 Гбіт/с, *XGS-PON* повністю задовольняє зростаючі вимоги до високошвидкісного симетричного доступу, що є критично важливим для нових сервісів та вимогливих абонентів. Хоча його вартість становить 2× – 3× від базової *GPON*, це виправдано значно вищою продуктивністю та довгостроковою актуальністю.

Інші стандарти, такі як *XG-PON*, *NG-PON2* та *PtP WDM PON*, хоча і пропонують певні переваги у швидкості, мають суттєві обмеження, що робить їх

33

менш оптимальними для масового проектування мереж доступу на сучасному етапі:

- *XG-PON* хоч і пропонує 10 Гбіт/с *Downstream*, його асиметричний *Upstream* (2.5 Гбіт/с) вже не повністю відповідає сучасним вимогам до симетричності.

- *NG-PON2* та особливо *PtP WDM PON* мають значно вищі швидкості, але їхня орієнтовна вартість реалізації (3× – 5× і вище, до 8× відповідно) робить їх економічно недоцільними для широкого розгортання в типових мікрорайонах на сьогоднішній день.

34

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖ ДОСТУПУ *GPON* ТА *XGS-PON*: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ

3.1 Вихідні дані та загальні принципи проєктування

Проєктування ефективної телекомунікаційної мережі доступу є фундаментальним завданням, що вимагає глибокого аналізу технічних можливостей, економічної доцільності та стратегічних перспектив різних технологічних рішень. Метою даного розділу є не просто розробка проєкту мережі, а проведення порівняльного аналізу двох провідних стандартів пасивних оптичних мереж – *GPON* та *XGS-PON* – у контексті конкретного міського мікрорайону. Це дозволить обґрунтувати вибір оптимального підходу для побудови сучасної мережі доступу, що відповідає поточним потребам та є гнучкою до майбутніх вимог.

3.1.1 Опис досліджуваного району

Об'єктом проєктування обрано типовий міський "спальний" мікрорайон міста Кривий Ріг, а саме мікрорайон «Гірницький». Даний район характеризується щільною забудовою багатоповерховими житловими будинками, що створює високу концентрацію потенційних абонентів та є оптимальним сценарієм для розгортання оптоволоконних мереж доступу.

Основні характеристики району для проєктування:

- кількість будинків у районі: 50 дев'ятиповерхових будівель; - кількість під'їздів у кожному будинку: для зручності будемо вважати, що всі будинки в нашому районі 4-х під'їзні;

- кількість квартир у кожному під'їзді: 36 квартир.

План мікрорайону, що ілюструє його географічне розташування та щільність забудови, представлено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – План мікрорайону «Гірницький» міста Кривий Ріг для підключення абонентів

3.1.2 Визначення потенційної абонентської бази та цільового відсотка проникнення

Першим кроком у проєктуванні є визначення загального потенціалу абонентської бази мікрорайону. Загальна кількість квартир розраховується за формулою:

$$N_{\text{кв}} = N_{\text{буд}} \times N_{\text{під}} \times N_{\text{кв/під}},$$

де: $N_{\text{буд}}$ – кількість будинків у районі;

$N_{\text{під}}$ – кількість під'їздів у будинку;

$N_{\text{кв/під}}$ – кількість квартир у під'їзді.

Підставляючи вихідні дані, отримаємо:

$$N_{\text{кв}} = 50 \times 4 \times 36 = 7200 \text{ квартир}$$

Таким чином, у мікрорайоні потенційно може бути підключено до 7200 абонентів.

При проєктуванні нової мережі доступу рідко планується 100% покриття абонентів на початковому етапі через значні капітальні витрати та ринкові умови. Натомість, орієнтуються на певний цільовий відсоток проникнення, що дозволяє оптимізувати інвестиції та забезпечити економічну доцільність проєкту з урахуванням подальшого зростання. Виходячи з аналізу ринку фіксованого доступу в Україні (як зазначено в розділі 1) та типових показників для міських районів, цільовий відсоток проникнення для даного проєкту встановлено на рівні 70-80%. Це забезпечує як розумну стартову завантаженість мережі, так і потенціал для подальшого нарощування абонентської бази.

При цільовому відсотку проникнення 80% (для розрахунку максимальної потреби):

$$N_{\text{абонентів}} = 7200 \times 0.80 = 5760 \text{ абонентів}$$

Для подальших розрахунків ємності мережі та вибору обладнання будемо орієнтуватися на обслуговування до 5760 абонентів.

3.2 Проєктування мережі доступу на базі GPON

Цей підрозділ присвячений детальному проєктуванню мережі доступу для обраного мікрорайону на базі технології GPON (*Gigabit Passive Optical Network*). Розглянуті архітектурні рішення, виконані розрахунки оптичного бюджету та обґрунтовано вибір необхідного активного та пасивного обладнання.

37

3.2.1 Особливості архітектури та топології для GPON в обраному районі

Для ефективної та економічно доцільної побудови GPON-мережі в умовах щільної багатоповерхової забудови мікрорайону обрано деревоподібну топологію з двоступеневим каскадним сплітуванням. Цей підхід дозволяє оптимально

використовувати оптичні волокна, мінімізувати їхню кількість у магістральній частині та забезпечити гнучке підключення абонентів.

При проєктуванні мережі доступу на базі технології *GPON* ключовим етапом є вибір оптимальної схеми оптичного сплітування, яка забезпечує баланс між економічною ефективністю, зручністю розгортання та відповідністю вимогам оптичного бюджету. На основі проведеного аналізу різних конфігурацій, для даного проєкту обрано двоступеневу схему каскадного сплітування: сплітер першого рівня 1:2 та сплітер другого рівня 1:32 (рисунок 3.2). Загальний коефіцієнт сплітування для кожного *OLT*-порту таким чином складає $1:2 \times 1:32 = 1:64$.

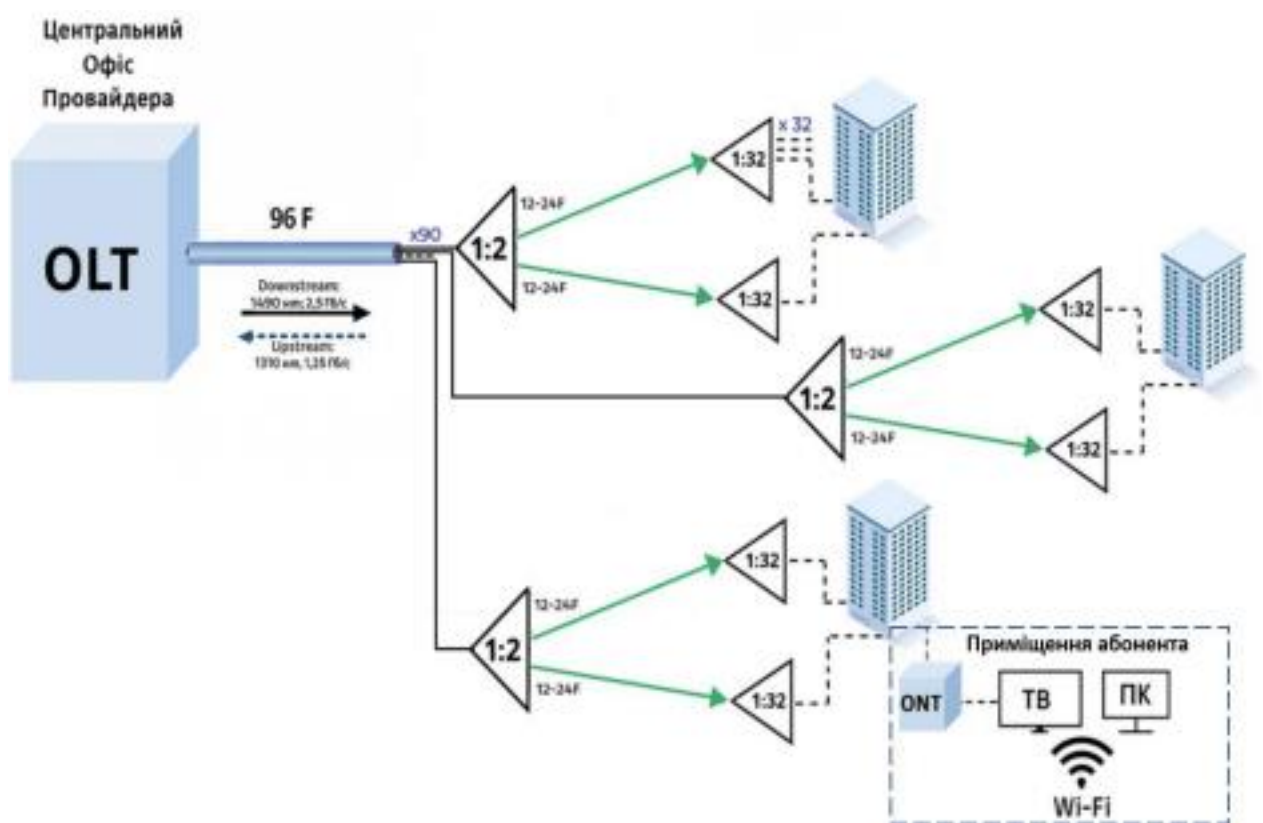


Рисунок 3.2 – Архітектура мережі *GPON* з двоступеневим каскадним сплітуванням

38

Опис ключових елементів архітектури *GPON* (згідно рисунку 3.2): -

Центральний Вузол (*OLT* – *Optical Line Terminal*): Розташований у центральному офісі провайдера та є відправною і кінцевою точкою для оптичного сигналу. *OLT* обробляє дані та направляє їх у вигляді оптичного сигналу в мережу. - Магістральна оптична лінія: від *OLT* прокладається багатоволоконний оптичний кабель

(наприклад, з 96 волокнами) до мікрорайону, що забезпечує основний канал передачі даних від провайдера. Трасування здійснюється по існуючих кабельних каналізаціях або повітряно-кабельній інфраструктурі, з урахуванням мінімізації довжини та забезпечення доступності. - Сплітер першого рівня (1:2): розташований після магістральної лінії, зазвичай у зовнішній оптичній муфті або розподільчій шафі. Цей пасивний пристрій ділить оптичний сигнал на дві гілки, зменшуючи необхідну кількість волокон для подальшого розподілу.

- Розподільчі оптичні лінії: Дві лінії оптичних кабелів (наприклад, по 24 волокна), що виходять зі сплітера 1:2 і прямують до відповідних груп будинків або до окремих великих будівель, забезпечуючи підключення до абонентської зони.

- Сплітери другого рівня (1:32): Кожен сплітер 1:32 розташовується безпосередньо в межах житлового будинку (наприклад, у під'їзді або технічному приміщенні). Ці сплітери отримують сигнал з розподільчих ліній і розгалужують його на 32 окремі абонентські лінії.

- Абонентські оптичні лінії (*Drop*-кабелі): від кожного сплітера другого рівня (1:32) відходять окремі оптичні волокна (абонентські *drop*-кабелі) до кожної квартири, де встановлюється оптичний мережевий термінал (*ONT*). Це відповідає архітектурі *FTTH (Fiber to the Home)*, яка забезпечує найвищу надійність та пропускну здатність для кінцевого користувача, усуваючи необхідність у проміжному активному обладнанні всередині будівлі.

- Оптичний Мережевий Термінал (*ONT – Optical Network Terminal*): розташований у приміщенні абонента на кінці абонентської лінії. *ONT* приймає оптичний сигнал, перетворює його в електричний і надає інтерфейси для

підключення кінцевих пристроїв, таких як персональний комп'ютер, телевізор або *Wi-Fi* роутер.

Виходячи з розрахункової кількості 5760 потенційних абонентів (80% проникнення) та коефіцієнта сплітування 1:64, орієнтовна кількість портів *GPON OLT*, необхідних

для покриття всього мікрорайону, становитиме: $N_{\text{портів_OLT}} = 5760 / 64 = 90$ портів

GPON.

Для забезпечення гнучкості та резервування, планується використовувати *OLT*, що підтримує не менше 96-128 *GPON*-портів.

3.2.2 Розрахунок оптичного бюджету потужності для *GPON* Розрахунок оптичного бюджету потужності є критично важливим для гарантування якості та стабільності передачі сигналу в *GPON*-мережі. Він дозволяє переконатися, що потужність оптичного сигналу на приймачі *ONT/ONU* є достатньою після проходження всіх елементів оптичного шляху. Розрахунок виконано для найбільш протяжної гілки мережі, яка визначає мінімально допустимі втрати.

Для *GPON*-обладнання класу *B+* (найбільш поширений клас) типовими значеннями є:

- вихідна потужність *OLT* ($P_{\text{OLT_вихід}}$): +3 дБм
- чутливість приймача *ONT/ONU* ($S_{\text{ONT_приймач}}$): -27 дБм
- оптичний бюджет: $P_{\text{бюджет}} = +3 - (-27) = 30$ дБ

Експлуатаційний запас на деградацію волокна, старіння конекторів та можливі додаткові з'єднання становить 1 дБ. Таким чином, сумарні допустимі втрати в лінії не повинні перевищувати $30 - 1 = 29$ дБ.

Припустимо, що максимальна довжина оптичної лінії від *OLT* до найвіддаленішого *ONT/ONU* в мікрорайоні становить 3 км. Розрахунок бюджету втрат для *GPON* на цій гілці представлено в таблиці 3.1. При розрахунках втрати розгалуження сплітерів взяті типовими для *PLC*-сплітерів. Кількість зварок та з'єднувачів є приблизною і може змінюватися залежно від детального плану трасування та монтажу [8, 9,10].

40

Таблиця 3.1 – Розрахунок бюджету втрат на найбільш протяжній гілці для *GPON* (3 км)

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	Довжина хвилі (Upstream) 1310 нм	Довжина хвилі (Downstream) 1490 нм
Коефіцієнт загасання волокна (типовий для	дБ/км	0,35	0,25

G.652D)			
Загасання, що вноситься волокном (3 км)	дБ	$3 \times 0,35 = 1,05$	$3 \times 0,25 = 0,75$
Сумарні втрати в зварюваннях (5 зварок по 0,1 дБ)	дБ	$5 \times 0,1 = 0,5$	$5 \times 0,1 = 0,5$
Втрати на патч-кордах (2 шт. по 0,3 дБ на OLT/ONT)	дБ	$2 \times 0,3 = 0,6$	$2 \times 0,3 = 0,6$
Сумарні втрати в з'єднувачах (4 шт. по 0,3 дБ)	дБ	$4 \times 0,3 = 1,2$	$4 \times 0,3 = 1,2$
Втрати розгалуження сплітера 1:2 (перший рівень)	дБ	3,5	3,5
Втрати розгалуження сплітера 1:32 (другий рівень)	дБ	17	17
Загасання в кінцевих з'єднаннях (абонентська розетка)	дБ	0,5	0,5
Втрати на абонентському дроті (20 м по 0,5 дБ/км)	дБ	$0,02 \times 0,5 = 0,01$	$0,02 \times 0,5 = 0,01$
Сумарні розрахункові втрати лінії (без запасу)	дБ	24,36	24,06
Експлуатаційний запас	дБ	1	1
Сумарні втрати лінії (з урахуванням запасу)	дБ	25,36	25,06

3.2.3 Вибір активного та пасивного обладнання GPON

Вибір обладнання здійснюється з урахуванням функціональних вимог, розрахункового оптичного бюджету та економічної доцільності. **Активне обладнання:**

1) Оптичний Лінійний Термінал (OLT):

- Тип: модульний, з підтримкою плат GPON. Для обслуговування 5760 потенційних абонентів при коефіцієнті сплітування 1:64 нам знадобиться близько 90 портів GPON. Щоб забезпечити гнучкість, резервування та можливість подальшого

масштабування, доцільно обрати *OLT*-шасі, що підтримує не менше 96-128 *GPON*-портів. Це може бути *OLT* середньої ємності. Приклади таких платформ: *Huawei MA5800-X7* (який має 7 сервісних слотів), *ZTE C300* (до 16 сервісних слотів). Якщо одна *GPON*-плата має 8 або 16 портів, то для 90 портів знадобиться 6-12 таких плат.

41

- Аплінк-інтерфейси: необхідні порти *10GE/25GE* для підключення до магістральної мережі провайдера. Кількість аплінк-портів розраховується з урахуванням сукупного трафіку, що генерується 90 *GPON*-портами (хоча реальний агрегований трафік буде значно меншим за суму всіх "пікових" абонентських швидкостей).

- Функціональність: підтримка повного функціоналу *GPON (ITU-T G.984)*,

QoS, VLAN, multicast (IGMP), безпека (шифрування *AES-128*). 2) Оптичний Мережевий Термінал (*ONT/ONU*):

- Тип: *HGU (Home Gateway Unit)* для більшості абонентів, що надає *Wi-Fi, Ethernet*-порти, а також, за потреби, *FXS*-порти для *VoIP*. Для бізнес-клієнтів або простіших підключень можливе використання *Bridge-ONT*.

- Інтерфейси: *4xGE Ethernet*-порти, *Wi-Fi 802.11ac/ax (dual-band 2.4/5 GHz)*, 1-2 *FXS*-порти.

- Пропускна здатність: забезпечення до 1 Гбіт/с для абонента через *Ethernet* та *Wi-Fi*.

Пасивне обладнання:

1) Оптичні кабелі:

- Магістральні: зовнішні оптичні кабелі, до 96 волокон, з центральним силовим елементом або багатоповивним сердечником, для прокладки в каналізації або повітряно. Тип волокна *G.652D*.

- Розподільчі: зовнішні/внутрішні кабелі, 8-24 волокна, для прокладки від першого рівня сплітування до будинків.

- Абонентські (*Drop*-кабелі): тонкий оптичний кабель (1-2 волокна) з низьким радіусом вигину для прокладки від абонентської розподільчої коробки до квартири.

2) Оптичні сплітери (*PLC Splitters*):

- Перший рівень: сплітери 1:2 (наприклад, у герметичних муфтах або розподільчих шафах).

- Другий рівень: сплітери 1:32 (в абонентських боксах у під'їздах).

42

3) Оптичні муфти та розподільчі бокси:

- Магістральні муфти: для зварювання магістральних кабелів та розміщення сплітерів 1:2. Забезпечують високий ступінь захисту від зовнішнього середовища.

- Будинкові розподільчі бокси (*BDC/ODB*): компактні бокси для розміщення сплітерів 1:32 та організації абонентських підключень у під'їздах. 4) Оптичні крос-панелі (*ODF*): використовуються у центральному офісі для організації підключення магістральних оптичних кабелів до портів *OLT*. 5) Оптичні патч-корди та пігтейли: для з'єднань в *ODF*, муфтах, боксах та для підключення *ONT*.

3.2.4 Попередня оцінка вартості *GPON*-рішення

Реалізація мережі на базі *GPON* є найбільш економічно вигідним рішенням для масового розгортання в житловому секторі на поточному етапі. У таблиці 3.2 наведені орієнтовні ринкові ціни на основне обладнання *GPON* [4-7].

Таблиця 3.2 – Орієнтовні ринкові ціни на основне обладнання *GPON*

Назва обладнання	Орієнтовна ціна (\$)
<i>OLT</i> -шасі	10000 \$/шт.
Контрольна плата для <i>OLT</i>	2000 \$/шт.

Аплінк-плата (2 x 10GE) для <i>OLT</i>	2000 \$/шт.
<i>GPON</i> -плата (16 портів)	2000 \$/плата
<i>GPON ONT</i> (<i>Home Gateway Unit</i> , з <i>Wi-Fi</i>)	40 \$/шт.
Оптичний кабель магістральний (48 волокон)	0,7 \$/м
Оптичний кабель розподільчий (12-24 волокна)	0,4 \$/м
Оптичний абонентський кабель (<i>Drop</i> -кабель, 1 волокно)	0,15 \$/м
Сплітер 1:2 (<i>PLC</i>)	10 \$/шт.
Сплітер 1:32 (<i>PLC</i>)	40 \$/шт.
Оптична муфта (для першого рівня сплітування)	150 \$/шт.
Будинковий розподільчий бокс (для другого рівня сплітування)	50 \$/шт.

43

Для детального розрахунку капітальних витрат (*CAPEX*) на основне обладнання для розгортання мережі доступу на основі *GPON* (таблиця 3.3) будемо використовувати такі вихідні дані:

- загальна кількість потенційних абонентів: 5760;
- коефіцієнт сплітування *GPON*: 1:64 (1:2 на першому рівні, 1:32 на другому);
- кількість необхідних *GPON*-портів на *OLT*: 90 портів.

Таблиця 3.3 – Розрахунок капітальних витрат (*CAPEX*) на основне обладнання *GPON*

Категорія обладнання	Елемент обладнання	Кількість (шт./м)	Ціна за одиницю (\$)	Сумарна вартість (\$)
Активне обладнання <i>OLT</i>	<i>OLT</i> -шасі	1	10000	10000
	Контрольні плати	2	2000	4000

	Аплінк-плати	2	2000	4000
	<i>GPON</i> -плати (90/16≈6)	6	2000	12000
	ВСЬОГО:			30000
Абонентські <i>ONT</i>	<i>ONT</i> (5760 абонентів)	5760	40	230400
Пасивне обладнання <i>ODN</i>	Сплітери			8100
	Сплітери 1:2 (по 1 на порт <i>OLT</i>)	90	10	900
	Сплітери 1:32 (по 2 на порт <i>OLT</i>)	180	40	7200
	Оптичні кабелі			33420
	Магістральний (5 км)	5000	0.7	3500
	Розподільчий (10 км)	10000	0.4	4000
	Абонентський (5760×30 м)	172800	0.15	25920
	Допоміжне пасивне обладнання			22500
	Оптичні муфти (для 1:2 сплітерів)	90	150	13500
	Будинкові розподільчі бокси (для 1:32 сплітерів)	180	50	9000
Загальна попередня оцінка вартості обладнання для <i>GPON</i>				324420 \$

Можливості *GPON*-рішення:

- Задоволення поточного попиту: швидкості до 1 Гбіт/с для абонента повністю задовольняють переважну більшість поточних потреб домашніх користувачів.

- Мультисервісні послуги: надання Інтернету, *IPTV*, *VoIP*, що є базовим набором послуг для сучасного провайдера.

- Висока надійність: завдяки пасивності *ODN* та архітектурі *FTTH*, мережа *GPON* відрізняється високою надійністю та низькими операційними витратами (*OPEX*).

3.3 Проєктування мережі доступу на базі *XGS-PON*

Цей підрозділ розглядає альтернативний підхід до побудови мережі доступу для обраного мікрорайону, базуючись на технології *XGS-PON*. Метою є демонстрація можливостей та особливостей *XGS-PON*, що пропонує значно вищу симетричну пропускну здатність та більшу ємність на порт *OLT*. Важливо зазначити, що завдяки концепції "співіснування" (*coexistence*), фізична оптична інфраструктура (кабелі, сплітери) може залишатися незмінною порівняно з *GPON* (залежно від обраного коефіцієнта сплітування), тоді як основні відмінності полягають в активному обладнанні та оптичних параметрах.

3.3.1 Особливості архітектури та топології для *XGS-PON* в обраному районі

Архітектура та топологія мережі *XGS-PON* у досліджуваному мікрорайоні загалом зберігає деревоподібну структуру. Проте, для повного використання переваг *XGS-PON* щодо ємності порту *OLT* (до 128 абонентів), ми оптимізуємо коефіцієнт сплітування: сплітер першого рівня 1:4 та сплітер другого рівня 1:32 (рисунок 3.3), таким чином коефіцієнт сплітування для кожного *OLT*-порту складає $1:4 \times 1:32 = 1:128$.

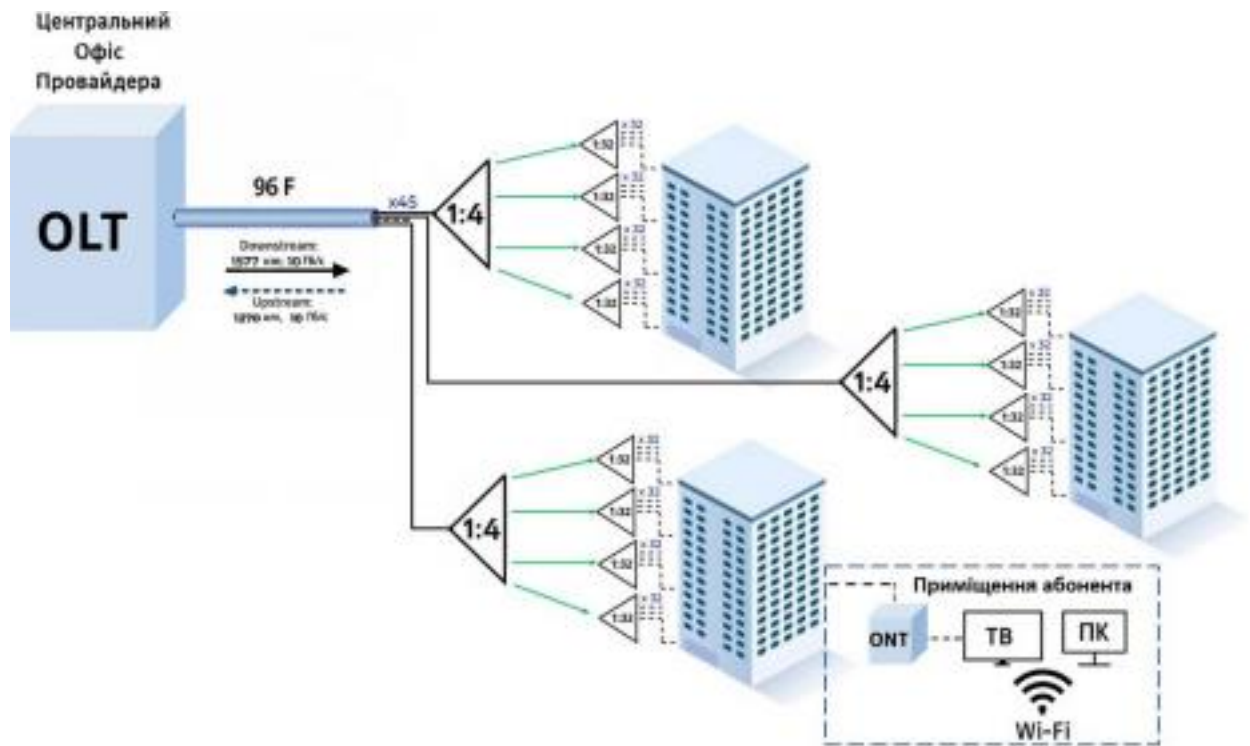


Рисунок 3.3 – Архітектура мережі *XGS-PON* з двоступеневим каскадним сплітуванням

Основні принципи топології:

- Розташування *OLT*: центральний вузол *OLT* залишається у центральному офісі провайдера.

- Магістральні та розподільчі ділянки: використовуються ті ж оптичні кабелі та маршрути прокладки, що й для *GPON*-мережі. Оптичне волокно є "незалежним від швидкості" і підтримує різні стандарти *PON*.

- Перший рівень сплітування (1:4): як і для *GPON*, на вході до мікрорайону встановлюються оптичні сплітери першого рівня з коефіцієнтом поділу 1:4. Це дозволяє розділити магістральні волокна на чотири гілки, кожна з яких обслуговуватиме окремих будинок/кластер будинків.

- Другий рівень сплітування (1:32): у кожному житловому будинку (або в окремих під'їздах/секціях) встановлюються оптичні розподільчі бокси, де розміщуються сплітери другого рівня з коефіцієнтом поділу 1:32. Таким чином, загальний коефіцієнт сплітування для одного порту *OLT* становить $1:4 \times 1:32 = 1:128$.

Це дозволяє одному порту *XGS-PON OLT* обслуговувати до 128 абонентів, максимально використовуючи ємність технології.

- Абонентська ділянка (*FTTH*): оптичне волокно прокладається безпосередньо до квартири абонента для підключення *ONT*, що забезпечує максимальну продуктивність.

Виходячи з розрахункової кількості 5760 потенційних абонентів (80% проникнення) та нового коефіцієнта сплітування 1:128, орієнтовна кількість портів *XGS-PON OLT*, необхідних для покриття всього мікрорайону, становитиме: $N_{\text{портів_OLT}} = 5760 / 128 = 45$ портів *XGS-PON*.

Таким чином, у порівнянні з *GPON*-рішенням (90 портів), *XGS-PON* дозволяє вдвічі зменшити кількість необхідних портів *OLT*, що може позитивно вплинути на вартість активного обладнання.

Основні відмінності у передачі сигналу порівняно з *GPON*:

- прямий потік (*Downstream*): 1577 нм з пропускною здатністю 10 Гбіт/с; -
зворотний потік (*Upstream*): 1270 нм з пропускною здатністю 10 Гбіт/с. Ці довжини хвиль дозволяють *XGS-PON* співіснувати з *GPON* на одному оптичному волокні за допомогою оптичних мультиплексорів (*WDM*-фільтрів) на *OLT* та *ONT*, надаючи оператору гнучкість у міграції та одночасному обслуговуванні абонентів за різними стандартами.

3.3.2 Розрахунок оптичного бюджету потужності для *XGS-PON* Методика розрахунку оптичного бюджету для *XGS-PON* аналогічна *GPON*, але необхідно враховувати інші параметри приймально-передавальних модулів, які можуть відрізнятися для 10-гігабітних інтерфейсів, а також збільшені втрати на сплітерах через коефіцієнт 1:128.

Для *XGS-PON*-обладнання (типовий клас *N1*) характерні такі значення: -

вихідна потужність *OLT* ($P_{\text{OLT_вихід}}$): +3 дБм;

- чутливість приймача *ONT/ONU* ($S_{\text{ONT_приймач}}$): -28 дБм;

- оптичний бюджет: $P_{\text{бюджет}} = +3 - (-28) = 31$ дБ.

47

Експлуатаційний запас, як і раніше, становить 1 дБ. Отже, сумарні допустимі втрати в лінії не повинні перевищувати $31 - 1 = 30$ дБ.

Використовуючи ту ж максимальну довжину оптичної лінії в 3 км та ті самі

параметри загасання волокна та втрат на пасивних компонентах, розрахунок бюджету втрат для *XGS-PON* представлено в таблиці 3.4 [8,9,10].

Таблиця 3.4 – Розрахунок бюджету втрат на найбільш протяжній гілці для *XGS-PON* (3 км)

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	Довжина хвилі (<i>Upstream</i>) 1270 нм	Довжина хвилі (<i>Downstream</i>) 1577 нм
Коефіцієнт загасання волокна (типовий для <i>G.652D</i>)	дБ/км	0,38	0,22
Загасання, що вноситься волокном (3 км)	дБ	$3 \times 0,38 = 1,14$	$3 \times 0,22 = 0,66$
Сумарні втрати в зварюваннях (5 зварок по 0,1 дБ)	дБ	$5 \times 0,1 = 0,5$	$5 \times 0,1 = 0,5$
Втрати на патч-кордах (2 шт. по 0,3 дБ на <i>OLT/ONT</i>)	дБ	$2 \times 0,3 = 0,6$	$2 \times 0,3 = 0,6$
Сумарні втрати в з'єднувачах (4 шт. по 0,3 дБ)	дБ	$4 \times 0,3 = 1,2$	$4 \times 0,3 = 1,2$
Втрати розгалуження сплітера 1:4 (перший рівень)	дБ	7,5	7,5
Втрати розгалуження сплітера 1:32 (другий рівень)	дБ	17,5	17,5
Загасання в кінцевих з'єднаннях (абонентська розетка)	дБ	0,5	0,5
Втрати на абонентському дроті (20 м по 0,5 дБ/км)	дБ	0,01	0,01
Сумарні розрахункові втрати лінії (без запасу)	дБ	28,95	28,47
Експлуатаційний запас	дБ	1	1
Сумарні втрати лінії (з урахуванням запасу)	дБ	29,95	29,47

3.3.3 Вибір активного та пасивного обладнання *XGS-PON*

Активне обладнання:

1) Оптичний Лінійний Термінал (*OLT*):

- Тип: модульний, з підтримкою *XGS-PON* плат. Для обслуговування 5760 потенційних абонентів при коефіцієнті сплітування 1:128 нам знадобиться близько 45 портів *XGS-PON*. Це дозволяє використовувати меншу або середню модель *OLT* шасі з меншою кількістю слотів, ніж для *GPON*, або ж значно зменшити кількість

48

лінійних карт у тому ж шасі. Приклади *OLT* з підтримкою *XGS-PON*: *Huawei MA5800-X2/X7*, *ZTE C600/C650*, *Nokia ISAM FX*. Важливо, що багато сучасних *OLT* підтримують так звані "*Combo-PON*" плати, які можуть одночасно обслуговувати як *GPON*, так і *XGS-PON* абонентів на одному оптичному порті, використовуючи різні довжини хвиль.

- Аплінк-інтерфейси: високошвидкісні порти *10GE*, *25GE*, або *100GE* для забезпечення належної пропускної здатності до транспортної мережі, враховуючи 10 Гбіт/с на кожному порту. Кількість аплінків має відповідати агрегованій пропускній здатності 45 *XGS-PON* портів.

- Функціональність: повна підтримка стандартів *ITU-T G.9807.1*, *QoS*, *VLAN*, *multicast*, а також розширені можливості для бізнес-сервісів. 2) Оптичний Мережевий Термінал (*ONT/ONU*):

- Тип: *XGS-PON ONT*, вони мають бути здатні працювати на відповідних довжинах хвиль *XGS-PON*. Зазвичай це *Router ONT (HGU)* з *2.5GE/10GE Ethernet* портами та підтримкою новітніх стандартів *Wi-Fi (Wi-Fi 6/6E/7)* для повної реалізації пропускної здатності.

- Інтерфейси: мінімум *1x10GE Ethernet*-порт, *Wi-Fi 802.11ax/be* (для максимального використання 10 Гбіт/с каналу), можливо, *FXS*-порти. Щодо **пасивного обладнання (*ODN*)** для мережі *XGS-PON*, слід зазначити, що більшість його компонентів ідентичні тим, що використовуються в *GPON* мережах. Це стосується оптичних кабелів (магістральних, розподільчих, абонентських), оптичних

муфт та будинкових розподільчих боксів. Ключова перевага полягає в тому, що одні й ті самі фізичні оптичні волокна та більша частина пасивних елементів можуть підтримувати обидві технології (*GPON* та *XGS-PON*) завдяки принципу співіснування. Єдиним винятком є сплітер першого рівня (1:4), який, хоча і є пасивним компонентом, може відрізнятися за характеристиками або ціною при розгортанні *XGS-PON*-мереж.

49

3.3.4 Попередня оцінка вартості *XGS-PON*-рішення

Реалізація мережі на базі *XGS-PON* вимагає більших початкових капітальних витрат (*CAPEX*) порівняно з *GPON*. Нижче наведено детальний розрахунок капітальних витрат на основне обладнання для *XGS-PON* (таблиці 3.5, 3.6) [4-7].
Вихідні дані для розрахунку:

- загальна кількість потенційних абонентів: 5760;
- коефіцієнт сплітування *XGS-PON*: 1:128 (1:4 на першому рівні, 1:32 на другому);
- кількість необхідних *XGS-PON*-портів на *OLT*: $5760/128 = 45$ портів.

Таблиця 3.5 – Орієнтовні ринкові ціни на основне обладнання *XGS-PON*

Назва обладнання	Орієнтовна ціна (\$)
<i>OLT</i> -шасі	10000 \$/шт.
Контрольна плата для <i>OLT</i>	2000 \$/шт.
Аплінк-плата (2 x 10GE) для <i>OLT</i>	2000 \$/шт.
<i>XGS-PON</i> -плата (16 портів)	5000 \$/плата
<i>XGS-PON ONT</i> (<i>Home Gateway Unit</i> , з <i>Wi-Fi</i>)	80 \$/шт.
Оптичний кабель магістральний (96 волокон)	0.7 \$/м
Оптичний кабель розподільчий (24 волокна)	0.4 \$/м
Оптичний абонентський кабель (<i>Drop</i> -кабель, 1 волокно)	0.15 \$/м

Сплітер 1:4 (<i>PLC</i>)	15 \$/шт.
Сплітер 1:32 (<i>PLC</i>)	40 \$/шт.
Оптична муфта (для першого рівня сплітування)	150 \$/шт.
Будинковий розподільчий бокс (для другого рівня сплітування)	50 \$/шт.

Таблиця 3.6 – Розрахунок капітальних витрат (*CAPEX*) на основне обладнання *XGS-PON*

Категорія обладнання	Елемент обладнання	Кількість (шт./м)	Ціна за одиницю (\$)	Сумарна вартість (\$)
Активне обладнання <i>OLT</i>	<i>OLT</i> -шасі	1	10000	10000
	Контрольні плати	2	2000	4000
	Аплінк-плати	2	2000	4000
	<i>XGS-PON</i> -плати (45/16≈3)	3	5000	15000
	ВСЬОГО:			33000
Абонентські <i>ONT</i>	<i>XGS-PON ONT</i> (5760 абонентів)	5760	80	460800
Пасивне обладнання <i>ODN</i>	Сплітери			7875
	Сплітери 1:4 (по 1 на порт <i>OLT</i>)	45	15	675
	Сплітери 1:32 (по 4 на порт <i>OLT</i>)	180	40	7200
	Оптичні кабелі			33420
	Магістральний (5 км)	5000	0.7	3500
	Розподільчий (10 км)	10000	0.4	4000
	Абонентський (5760×30 м)	172800	0.15	25920

	Допоміжне пасивне обладнання			15750
	Оптичні муфти (для 1:4 сплітерів)	45	150	6750
	Будинкові розподільчі бокси (для 1:32 сплітерів)	180	50	9000
Загальна попередня оцінка вартості обладнання для XGS-PON				550845 \$

3.4 Порівняльний аналіз варіантів реалізації та обґрунтування оптимального рішення

Технології *GPON* та *XGS-PON* є основними варіантами для побудови сучасних оптичних мереж доступу. Вони базуються на одній і тій же архітектурі "точка-багато точок" (*P2MP*), але мають суттєві відмінності у швидкості та загальних можливостях (таблиця 3.7).

51

Таблиця 3.7 – Порівняння технічних характеристик *GPON* та *XGS-PON*

Характеристика	Технологія	
	<i>GPON</i>	<i>XGS-PON</i>
Швидкість	Асиметрична (<i>Downstream</i>): до 2.5 Гбіт/с Симетрична (<i>Upstream</i>): до 1.25 Гбіт/с	Асиметрична (<i>Downstream</i>): до 10 Гбіт/с Симетрична (<i>Upstream</i>): до 10 Гбіт/с
Можливості	Достатньо для типових сучасних потреб домашніх користувачів: 4K-відео, веб-серфінг, онлайн ігри, хмарні сервіси (з обмеженою кількістю користувачів). Найбільш поширене та економічно ефективне рішення для масових підключень.	Задоволення майбутніх потреб у надвисоких швидкостях: 8K-відео, VR/AR, хмарний геймінг, високопродуктивні хмарні обчислення, обслуговування <i>SME</i> та високозавантажених абонентів. Забезпечує значний конкурентний перевагу та готовність до майбутніх інновацій.
Сплітування	У рамках проєкту: схема 1:2 + 1:32, загальне сплітування 1:64.	У рамках проєкту: схема 1:4 + 1:32, загальне сплітування 1:128.

При виборі оптимальної технології для проектування мережі доступу, крім технічних характеристик, ключове значення має ретельний аналіз економічних показників, а саме капітальних (*CAPEX*) та операційних (*OPEX*) витрат. Хоча пасивна інфраструктура (оптичні кабелі, сплітери) значною мірою ідентична для обох технологій, вартість активного обладнання та довгострокові експлуатаційні перспективи суттєво відрізняються. У таблиці 3.8 представлено порівняння *CAPEX* та *OPEX* для *GPON* та *XGS-PON*, що базується на попередніх розрахунках.

Таблиця 3.8 – Порівняння економічних показників *GPON* та *XGS-PON*

Показник	Технологія		Примітки / Пояснення
	<i>GPON</i>	<i>XGS-PON</i>	
Капітальні витрати			
Загальна оцінка вартості обладнання	324 000 \$	550 845 \$	
Вартість підключення 1 абонента	~ 56\$	~ 96\$	Обладнання <i>ONT</i> обрано з мінімальним базовим функціоналом (<i>bridge-mode</i>), що дозволяє зменшити вартість на одного абонента
Співвідношення <i>CAPEX</i> до <i>GPON</i>	1x (база)	~1.7x	Реалізація мережі на базі <i>XGS PON</i> вимагає приблизно у 1.7 рази більших початкових капітальних вкладень у порівнянні з <i>GPON</i> .

52

Продовження таблиці 3.8

Основні фактори відмінності у вартості	-	Дорожчі активне обладнання (<i>OLT</i> -плати, абонентські <i>ONT</i>)	Вартість пасивної інфраструктури (оптичні кабелі, сплітери, муфти, бокси) є схожою для обох технологій.
Операційні витрати			

Енергоспоживання (абсолютне)	Нижче	Дещо вище (через вищу пропускну здатність)	<i>XGS-PON</i> має значно кращу енергоефективність на біт переданої інформації. Пасивна природа <i>PON</i> -мереж забезпечує низькі <i>OPEX</i> .
Обслуговування експлуатаційні витрати на інфраструктуру	Схожі	Схожі	Витрати на обслуговування самої оптичної інфраструктури (кабелі, сплітери) залишаються приблизно однаковими.
Довгострокові витрати на модернізацію	Потенційно вищі (можлива потреба в частіших оновленнях активного обладнання)	Потенційно нижчі (дозволяє відтермінувати дороги модернізації, забезпечуючи "заділ на майбутнє")	<i>XGS-PON</i> дозволяє відтермінувати майбутні дороги модернізації.

На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки щодо доцільності впровадження кожного варіанту для даного мікрорайону, враховуючи поточні потреби та майбутні перспективи:

- *GPON* забезпечує достатню пропускну здатність для більшості сучасних домогосподарств. Має нижчі початкові капітальні витрати, що робить його привабливим для швидкого та економічного старту в районах з існуючим попитом на широкопугмовий доступ. Підходить для провайдерів з обмеженим стартовим бюджетом. Проте, у довгостроковій перспективі *GPON* може стати вузьким місцем для найбільш вимогливих користувачів або при появі нових, більш ресурсоємних сервісів. Потребуватиме модернізації активного обладнання в майбутньому.

- *XGS-PON* є стратегічно вигідним рішенням, оскільки він дозволяє негайно запропонувати абонентам найсучасніші симетричні швидкості, що є сильною конкурентною перевагою. Хоча початкові інвестиції вищі, це рішення "з заділом на майбутнє" на найближчі 10-15 років. Також гарантує відповідність мережі майбутнім стандартам та потребам, таким як 8K-відео, *IoT*, *VR/AR*, *Smart*

Home та високошвидкісні корпоративні послуги. Знижує ризики морального старіння

інфраструктури.

Отже, з огляду на тенденції ринку, зростання споживання трафіку та необхідність забезпечення конкурентоспроможності у довгостроковій перспективі, рекомендованим підходом є впровадження технології *XGS-PON*:

1) **Майбутня готовність (*Future-Proofing*):** хоча початкові капітальні витрати на *XGS-PON* приблизно у 1.7 рази вищі за *GPON*, ця інвестиція дозволяє побудувати мережу, яка буде актуальною та спроможною задовольняти потреби абонентів протягом тривалого періоду (10-15 років і більше) без необхідності дорогої та *disruptive* модернізації активного обладнання в найближчому майбутньому.

2) **Конкурентна перевага:** можливість запропонувати симетричні швидкості до 10 Гбіт/с відразу після запуску дозволяє провайдеру виділитися на ринку, привабити найбільш платоспроможних та вимогливих абонентів, а також обслуговувати сегмент *SOHO/SME*, який потребує високих швидкостей вивантаження. Це може призвести до вищого середнього доходу з абонента (*ARPU*).

3) **Спрощення міграції:** завдяки концепції співіснування, мережа *XGS-PON* може спочатку обслуговувати як абонентів 10G, так і пропонувати пакети *GPON* швидкостей (наприклад, 1 Гбіт/с), використовуючи відповідні *ONT*. Співіснування використовує технологію спектрального ущільнення (*WDM*), що дозволяє одночасно передавати різні сигнали *GPON* та *XGS-PON* по одному й тому ж оптичному волокну, використовуючи спеціальні фільтри для їх розділення. Це дозволяє провайдерам поступово оновлювати мережу, не замінюючи всю інфраструктуру одразу та гнучко управляти абонентською базою, пропонуючи різноманітні тарифні плани.

4) **Оптимізація *OPEX* у довгостроковій перспективі:** хоча *CAPEX* вищий, уникнення майбутніх капітальних витрат на оновлення активного обладнання та потенційне збільшення *ARPU* можуть компенсувати початкові інвестиції та забезпечити кращий фінансовий результат у довгостроковій перспективі.

54

Альтернативний підхід (для обмеженого бюджету). Якщо бюджет є дуже суворим обмеженням, можна розглянути поетапну стратегію:

1) Побудувати пасивну оптичну інфраструктуру (кабелі, сплітери 1:4 та 1:32) з урахуванням сумісності з *XGS-PON*.

2) На початковому етапі встановити *GPON OLT* та *GPON ONT*. 3) У майбутньому, коли з'явиться потреба та кошти, додавати *XGS-PON OLT*-плати та *ONT*, використовуючи функцію співіснування. Цей підхід дозволяє розпочати з меншими витратами, але вимагатиме додаткових капітальних вкладень та потенційно більш складного управління міграцією абонентів у майбутньому. 4) Однак, для нового будівництва та з метою забезпечення максимальної актуальності та інноваційності мережі, рекомендується одразу інвестувати у *XGS-PON*, позиціонуючи провайдера як лідера на ринку.

55

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено всебічний аналіз та обґрунтування підходів до проєктування сучасних мереж доступу на базі технологій *Passive Optical Network (PON)*, з особливим акцентом на порівнянні стандартів *GPON* та *XGS-PON*.

У першому розділі було визначено, що інтернет-провайдери відіграють ключову роль у забезпеченні доступу до глобальної мережі, виконуючи широкий спектр функцій від підключення та маршрутизації до підтримки якості та безпеки. Також було проведено огляд основних технологій мереж доступу (*xDSL*, *Ethernet*, *PON*, *FWA*), ідентифіковано їхні переваги та недоліки. Виявлено, що технологія *Passive Optical Network (PON)* вирізняється як найбільш перспективна завдяки своїй високій пропускну здатності, здатності передавати сигнали на великі відстані без активного обладнання, низьким експлуатаційним витратам (*OPEX*), високій масштабованості та захищеності від електромагнітних перешкод. Незважаючи на відносно високі початкові капітальні витрати (*CAPEX*), довгострокові переваги *PON* роблять її оптимальним вибором для будівництва сучасних мереж.

Другий розділ присвячено розгляду принципів роботи *PON*-мереж, їхньої архітектури та ключових компонентів, таких як оптичні лінійні термінали (*OLT*), оптичні мережеві термінали (*ONT*) та оптична розподільча мережа (*ODN*), включаючи оптичні кабелі, сплітери, муфти та розподільчі бокси. Усвідомлення взаємодії цих елементів є фундаментальним для ефективного проєктування та розгортання надійної оптичної інфраструктури, що мінімізує майбутні витрати на модернізацію.

В межах третього розділу проведено комплексний порівняльний аналіз двох

ключових стандартів *PON – GPON* та *XGS-PON* – за технічними та економічними показниками. Встановлено, що *GPON* є економічно доцільним рішенням для задоволення поточних потреб масового ринку та забезпечення швидкостей до 2.5 Гбіт/с. Однак, для забезпечення майбутньої готовності та конкурентоспроможності

56

рекомендовано впровадження технології *XGS-PON*. Хоча *XGS-PON* має вищі початкові капітальні витрати (приблизно у 1.7 рази), вона пропонує симетричні швидкості до 10 Гбіт/с, що є критичним для зростаючих потреб та нових сервісів. Ключовою перевагою є функція співіснування (*coexistence*), яка дозволяє одночасно експлуатувати *GPON* та *XGS-PON* на одній фізичній інфраструктурі, захищаючи інвестиції та надаючи гнучкість у міграції абонентів. Цей підхід забезпечує довгострокову актуальність мережі та знижує ризики морального старіння обладнання.

Таким чином, вибір *XGS-PON* для проєктування сучасної мережі доступу є стратегічно обґрунтованим рішенням, що забезпечує не лише відповідність поточним високим вимогам, а й готовність до подальшого експоненційного зростання потреб у пропускній здатності, гарантуючи довгостроковий успіх та конкурентоспроможність провайдера на ринку телекомунікаційних послуг.

57

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герман Богапов. Кількість ліній фіксованого доступу до інтернет зросла на 12% // Expert.com.ua. – 2024. [Електронний ресурс]. URL:

<https://expert.com.ua/180191-kilkist-liniy-fiksovanogo-dostupu-do-internet-zrosla-na-12.html> (дата звернення: 23.04.2025)

2. Ленков, С., Красильников, С., Колачов, С. і Заморока, О. Побудова розподільної мережі GPON. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. № 53. С. 105–110.

3. Національна стратегія розвитку широкопasmового доступу до Інтернету та План впровадження 2020 – 2025. Documents World Bank. [Електронний ресурс]. URL:

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/718581621848448316/pdf/A-National-Broadband-Development-Strategy-and-Implementation-Plan-Recommendations-to-the-Ministry-of-Digital-Transformation-Government-of-Ukraine.pdf> (дата звернення:

16.04.2025)

4. Обладнання GPON/GEPON: веб-сайт інтернет-магазину Magazun. [Електронний ресурс]. – URL: <https://magazun.com/uk/oborudovanie-gpon-gepon-uk> (дата звернення: 25.05.25)

5. Обладнання PON – ONU, OLT, SFP: веб-сайт інтернет-магазину NTema. URL: <https://ntema.com.ua/uk/catalog/pou-oborudovanie> (дата звернення: 25.05.25) 6.

Обладнання PON (GPON, GEAPON): веб-сайт інтернет-магазину MiaTis. URL: <https://miatis.com.ua/oborudovanie-pou-gpon-gepon> (дата звернення: 25.05.25) 7.

Обладнання PON: веб-сайт інтернет-магазину Mounblan. URL:

<https://mounblan.com.ua/obladnannia-pou> (дата звернення: 25.05.25) 8. Особливості

створення проєктів PON: веб-сайт LanMarket. URL:

<https://lanmarket.ua/ua/stats/osoblivosti-stvorennia-proektiv-pou/> (дата звернення: 21.05.25)

9. Пам'ятка з розрахунку оптичного бюджету в мережах PON: веб-сайт SEALAN. URL: <https://sealan.net.ua/ua/a470990-pamyatka-raschetu-opticheskogo.html> (дата звернення: 21.05.25)

58

10. Практика проєктування пасивних оптичних мереж (PON): веб-сайт DEPS. URL: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/articles/praktika-proektyvanna-passivnyh-opticheskikh-setej-pou.html> (дата звернення: 21.05.25)

11. Стеценко В.П., Тітова Л.О. Сучасні мережні технології: навч. посіб. / МОН України, Уманський держ. пед. ун-т імені Павла Тичини; уклад.: Стеценко В. П., Тітова Л. О. – Умань: Візаві, 2022. – 153 с. [Електронний ресурс] URL: https://dspace.udpu.edu.ua/bitstream/123456789/16352/1/%D0%A1%D1%83%D1%87%D0%B0%D1%81%D0%BD%D1%96_%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%BD%D1%96_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97.pdf (дата звернення: 27.04.25)

12. Технологія PON: що це таке, принцип дії, переваги: веб-сайт Mstream. URL: <https://mstream.com.ua/uk/pou-technology-faq.html> (дата звернення: 28.04.25) 13.

Юлія Сабадишина. В Україні зростає кількість абонентів, що мають інтернет на базі xPON. Які регіони лідирують: веб-сайт dou.ua. URL:

<https://if.informator.ua/2024/11/28/frankivshhyna-lidyruye-a-kyyv-pase-zadnih-za-kilkisty-korystuvachiv-internetu-na-bazi-xpon> (дата звернення: 23.04.25) 14. Як

влаштований Інтернет і хто такі інтернет-провайдери?: веб-сайт компанії «Макснет».

URL: <https://maxnet.ua/blog/yak-vlashtovaniy-internet-i-hto-taki-internet-provayderi> (дата звернення: 21.04.25)

15. Які бувають рівні провайдерів і який краще вибрати бізнесу? : веб-сайт GigaTrans. URL: <https://gigatrans.ua/ua/news/kakie-buvayut-urovni-provayderov-i-kakoy-luchshe-vubirat-biznesu> (дата звернення: 21.04.25)

16. 8 Revolutionary Steps: The Evolutionary Path of PON Technology. FS.com. URL: [8 Revolutionary Steps: The Evolutionary Path of PON Technology](#) (дата звернення: 21.04.25)

17. Heng Yunjun. 1G to the Home: Vision and Initiation. ZTE Technologies. Issue 5, 2019 [Електронний ресурс]. – URL: [1G to the Home: Vision and Initiation](#) (дата звернення: 21.04.25)

18. Qing Xu. What the future holds for next-generation PON technologies// Cabling Installation & Maintenance. 2022. [Електронний ресурс]. URL: [What the future holds for next-generation PON technologies | Cabling Installation & Maintenance](#) (дата звернення: 27.04.25)

КРИВОРІЗЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
ДЕРЖАВНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу

випускника спеціальності: 123 «Комп'ютерна інженерія»

відділення: комп'ютерної та програмної інженерії

циклова комісія: комп'ютерних систем та мереж

Микита ПЛАНДОВСЬКИЙ

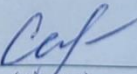
(ім'я, прізвище)

1. Актуальність теми: тема кваліфікаційної роботи «Технологія PON як основа для побудови ефективної мережі доступу» є актуальною та сучасною.
2. Кваліфікаційна робота відповідає темі, затвердженій наказом.
3. Завдання на виконання кваліфікаційної роботи виконано у повному обсязі.
4. У роботі послідовно розкриваються як теоретичні основи та роль PON-технологій у побудові мереж доступу для інтернет-провайдерів, так і практичні питання вибору оптимального обладнання, техніко-економічної оцінки та формування рекомендацій для ефективної та перспективної розбудови мереж.
5. Матеріал викладено чітко, логічно та послідовно. Текст роботи добре структурований, графічний матеріал (рисунок та таблиці) виконаний якісно, є наочним і доповнює текст. Оформлення роботи відповідає встановленим вимогам.
6. Для повнішої картини та формування стратегії на більш довгостроковий термін, рекомендовано враховувати тенденції розвитку наступних поколінь PON (наприклад, 25G/50G/100G-PON) та їх вплив на інвестиційні рішення.
7. Кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно».

Рецензент _____ викладач вищої категорії

(науковий ступінь, посада)

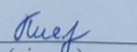
« _____ » _____ 2025 р.


(підпис)

Світлана ДАЦЕНКО

(ім'я, прізвище)

З рецензією ознайомлений _____


(підпис)

Микита ПЛАНДОВСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

КРИВОРІЗЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ
ДЕРЖАВНОГО НЕКОМЕРЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

ВІДГУК
керівника кваліфікаційної роботи

випускника спеціальності: 123 «Комп'ютерна інженерія»

відділення: комп'ютерної та програмної інженерії

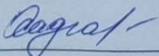
циклова комісія: комп'ютерних систем та мереж

Микита ПЛАНДОВСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

1. Кваліфікаційна робота на тему: «Технологія PON як основа для побудови ефективної мережі доступу»
2. Мета кваліфікаційної роботи полягає в обґрунтуванні оптимальних підходів до проєктування сучасних мереж доступу на базі технологій GPON та XGS-PON для інтернет-провайдерів, а також формуванні рекомендацій щодо вибору та реалізації цих рішень з урахуванням технічних та економічних аспектів.
3. Кваліфікаційна робота відповідає темі, затвердженій наказом начальника коледжу.
4. Кваліфікаційна робота виконана здобувачем освіти самостійно.
5. Микита ПЛАНДОВСЬКИЙ продемонстрував вміння самостійно працювати з різноманітними джерелами інформації, аналізувати складні технічні та економічні дані, формулювати обґрунтовані висновки та аргументувати свою позицію.
6. Кваліфікаційна робота оформлена згідно з встановленими вимогами. Виклад матеріалу чіткий, послідовний з дотриманням академічного стилю.
7. Рівень виконаної кваліфікаційної роботи заслуговує оцінку «відмінно», відповідає набутих випускником знань, умінь та навичок, вимогам освітньої характеристики фахівця і можливість присвоєння йому кваліфікації фахівця освітнього ступеня «Фаховий молодший бакалавр» спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія».

Керівник кваліфікаційної роботи

«09» 06 2025 р.  Оксана ОСАДЧА
(підпис) (ім'я, прізвище)