

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

**Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Порівняльний аналіз технологій побудови оптоволоконних мереж
доступу»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ТС-21

Мяло Ярослав Андрійович _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕКІР, доцент

Носков Вячеслав Іванович _____

Рецензент:

Незалежний експерт з телекомунікацій,

к.т.н. Вахрушев Володимир Платонович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Мялу Ярославу Андрійовичу

1. Тема роботи «Порівняльний аналіз технологій побудови оптоволоконних мереж доступу», керівник роботи Носков Вячеслав Іванович, доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912 -С _____
2. Термін подання студентом роботи 9 червня 2026 року
3. Вихідні дані до роботи: матеріали статей та наукових видань, інформаційні ресурси мережі Інтернет, навчально-методичні матеріали. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.
4. Зміст роботи: Обґрунтувати актуальність теми. Огляд технологій широкосмугового доступу по оптичному кабелю, навести їх технічні особливості, переваги та недоліки, розглянути можливу архітектуру побудови оптоволоконних мереж доступу та сфери її використання. Виконати аналіз технічних принципів побудови активних та пасивних мереж оптоволоконного доступу, включаючи і перспективні. Визначити критерії та виконати порівняльний аналіз технологій оптоволоконного доступу.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

- 1) Тема, мета, об'єкт та предмет дослідження
- 2) Еволюція мереж доступу від мідних технологій до оптоволоконних рішень
- 3) Архітектура мереж оптоволоконного доступу
- 4) Порівняння пасивних та активних оптоволоконних мереж
- 5) Еволюція стандартів пасивних оптичних мереж доступу
- 6) Загальна структура мережі доступу GPON
- 7) Загальна структура мереж GE-PON та 10GE-PON
- 8) Основні компоненти пасивної оптичної мережі доступу
- 9) Приклад розміщення основних компонентів у мережі FTTH
- 10) Порівняння стандартів побудови мереж доступу за технологією PON
- 11) Моделі розгортання оптоволоконних мереж доступу в міських і сільських регіонах
- 12) Висновки

6. Дата видачі завдання 31 жовтня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд оптоволоконних мереж доступу	15.03.2026	
2	Технічні принципи побудови оптоволоконних мереж доступу	30.04.2026	
3	Порівняльний аналіз технологій оптоволоконного доступу	15.05. 2026	
4	Практичні аспекти впровадження мереж оптоволоконного доступу	25.05.2026	
5	Вступ, Висновки	1.06.2026	
6	Чистовий варіант дипломної роботи, презентація	5.06.2026	

Студент

Ярослав МЯЛО

Керівник роботи

Вячеслав НОСКОВ

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи: 109 с., 11 рис., 18 табл., 21 джерело.

Актуальність роботи зумовлена швидким зростанням потреб користувачів у стабільному та високошвидкісному доступі до інтернету, а також постійним збільшенням обсягів цифрового трафіку в сучасних телекомунікаційних мережах. Через мережі доступу сьогодні передаються відео високої якості, хмарні сервіси, дані онлайн-навчання, відеоконференцій, систем відеоспостереження, корпоративних застосунків та пристроїв Інтернету речей. У таких умовах традиційні технології на основі мідних ліній не завжди здатні забезпечити необхідну швидкість, стабільність і якість зв'язку.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку мереж доступу є впровадження оптоволоконних технологій. Оптичне волокно має високу пропускну здатність, низький рівень втрат сигналу, стійкість до електромагнітних завад і значний запас для подальшої модернізації. Саме тому оператори зв'язку поступово переходять від xDSL, HFC та інших застарілих рішень до архітектур FTTx, зокрема FTTN, FTTB, FTTC і FTTO. При цьому вибір конкретної технології оптоволоконного доступу потребує технічного та економічного обґрунтування, оскільки GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON, 25G-EPON, 50G-PON і 50G-EPON мають різні характеристики, можливості, вартість і сферу застосування.

Метою роботи є порівняльний аналіз технологій побудови оптоволоконних мереж доступу та визначення умов, за яких доцільно застосовувати ту чи іншу технологію.

Для досягнення поставленої мети в роботі було розглянуто еволюцію мереж доступу від мідних технологій до сучасних оптоволоконних рішень. Проаналізовано базові архітектури FTTx, зокрема FTTN, FTTC, FTTB, FTTN і FTTO, а також визначено їхні особливості, переваги та обмеження. Окрему увагу приділено пасивним та активним оптоволоконним мережам доступу, принципам

їх побудови, складу обладнання, вартості експлуатації та можливостям керування трафіком.

У роботі досліджено технічні принципи побудови оптоволоконних мереж доступу, зокрема топології «точка - точка» та «точка - багато точок», схеми розміщення оптичних сплітерів, особливості розрахунку оптичного бюджету та роль оптичної розподільчої мережі. Розглянуто основні компоненти таких мереж: OLT, ONT/ONU, оптичне волокно, муфти, кроси, сплітери, конектори та активні комутатори. Також проаналізовано стандарти пасивних оптичних мереж доступу, розроблені організаціями ITU-T та IEEE.

Проведений аналіз показав, що GPON залишається поширеним і економічно вигідним рішенням для масового підключення абонентів, тоді як XGS-PON краще відповідає сучасним вимогам до симетричної швидкості та підтримки високонавантажених сервісів. Технології EPON і 10G-EPON є важливими для Ethernet-орієнтованих мереж, а NG-PON2, 25G-EPON, 50G-PON і 50G-EPON можуть розглядатися як перспективні рішення для подальшого розвитку оптичного доступу. Вибір конкретної технології повинен залежати від типу забудови, щільності абонентів, вимог до швидкості, економічної доцільності, доступності наявної інфраструктури та планів подальшої модернізації мережі.

Об'єктом дослідження є оптоволоконні мережі доступу.

Предметом дослідження виступають технології побудови оптоволоконних мереж доступу, їхні технічні характеристики, архітектури, стандарти та критерії порівняння.

Ключові слова: ОПТОВОЛОКОННІ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ, FTTx, FTTH, FTTB, FTTC, PON, AON, GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON, 25G-EPON, 50G-PON, 50G-EPON, OLT, ONT, ONU, ODN, ITU-T, IEEE, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, СПЛІТЕРИ, QoS.

ABSTRACT

Text part of the qualification thesis: 109 pages, 11 figures, 18 tables, 21 references.

The relevance of the work is determined by the rapid growth of users' demand for stable and high-speed Internet access, as well as by the constant increase in digital traffic volumes in modern telecommunication networks. Access networks today transmit high-quality video, cloud services, online learning data, video conferencing traffic, video surveillance system data, corporate applications, and Internet of Things devices. Under these conditions, traditional technologies based on copper lines are not always able to provide the required speed, stability, and quality of communication.

One of the most promising directions in the development of access networks is the implementation of fiber-optic technologies. Optical fiber has high bandwidth, low signal loss, resistance to electromagnetic interference, and significant potential for further modernization. Therefore, communication operators are gradually moving from xDSL, HFC, and other outdated solutions to FTTx architectures, including FTTH, FTTB, FTTC, and FTTO. At the same time, the choice of a specific fiber-optic access technology requires technical and economic justification, since GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON, 25G-EPON, 50G-PON, and 50G-EPON have different characteristics, capabilities, costs, and areas of application.

The purpose of the work is to conduct a comparative analysis of fiber-optic access network technologies and to determine the conditions under which each technology should be applied.

To achieve this purpose, the work examines the evolution of access networks from copper technologies to modern fiber-optic solutions. The basic FTTx architectures are analyzed, including FTTN, FTTC, FTTB, FTTH, and FTTO, and their features, advantages, and limitations are defined. Special attention is paid to passive and active fiber-optic access networks, the principles of their construction, equipment composition, operating costs, and traffic management capabilities.

The work studies the technical principles of building fiber-optic access networks, including point-to-point and point-to-multipoint topologies, optical splitter placement schemes, features of optical budget calculation, and the role of the optical distribution network. The main components of such networks are considered: OLT, ONT/ONU, optical fiber, splice closures, optical distribution frames, splitters, connectors, and active switches. The standards of passive optical access networks developed by ITU-T and IEEE are also analyzed.

A separate section of the work is devoted to comparing GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, and 10G-EPON technologies. The comparison is carried out according to such criteria as data transmission rate, operating distance, scalability, implementation cost, power consumption, reliability, QoS support, compatibility with existing infrastructure, and prospects for further modernization. The work also considers promising technologies such as 40G-PON, 50G-PON, 25G-EPON, and 50G-EPON, which can be used in networks with high load and increased bandwidth requirements.

The conducted analysis shows that GPON remains a widespread and cost-effective solution for mass subscriber connection, while XGS-PON better meets modern requirements for symmetrical speed and support of high-load services. EPON and 10G-EPON technologies are important for Ethernet-oriented networks, whereas NG-PON2, 25G-EPON, 50G-PON, and 50G-EPON can be considered promising solutions for the further development of optical access. The choice of a specific technology should depend on the type of development area, subscriber density, speed requirements, economic feasibility, availability of existing infrastructure, and plans for further network modernization.

The object of the study is fiber-optic access networks.

The subject of the study is the technologies for building fiber-optic access networks, their technical characteristics, architectures, standards, and comparison criteria.

Keywords: FIBER-OPTIC ACCESS NETWORKS, FTTx, FTTH, FTTB, FTTC, PON, AON, GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON, 25G-

EPON, 50G-PON, 50G-EPON, OLT, ONT, ONU, ODN, ITU-T, IEEE, OPTICAL FIBER, SPLITTERS, QoS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ ...	11
ВСТУП.....	15
1 ОГЛЯД ОПТОВОЛОКОННИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ	17
1.1 Еволюція мереж доступу: від мідних технологій до оптоволокна.....	17
1.2 Базові поняття архітектури оптоволоконних мереж доступу: FTTx.....	21
1.3 Загальний огляд пасивних та активних оптоволоконних мереж доступу	26
Висновки до розділу 1.....	30
2 ТЕХНІЧНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ОПТОВОЛОКОННИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ	32
2.1 Топологія оптоволоконних мереж доступу.....	32
2.2 Активні та пасивні мережі оптоволоконного доступу	37
2.3 Стандарти пасивних мереж оптоволоконного доступу	43
2.4 Технічні принципи побудови мереж доступу GPON, XG-PON за стандартами ITU-T.....	48
2.5 Технічні принципи побудови GE-PON, 10GE-PON за стандартами IEEE	53
2.6 Оптичні компоненти: OLT, ONT/ONU, оптоволокно, сплітери, активні комутатори.....	58
2.7 Перспективні технології оптоволоконного доступу: 40G-PON, 50G-PON, 25/50GE-PON	64
2.8 Питання сумісності мереж доступу різних стандартів	69
Висновки до розділу 2.....	74
3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕНОЛОГІЙ	76
3.1 Порівняння GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON.....	76
3.2 Ключові критерії оцінки технологій оптоволоконного доступу	80
3.3 Графіки та таблиці порівняння технологій PON.....	84
Висновки до розділу 3.....	91
4 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТОВОЛОКОННИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ	92
4.1 Моделі розгортання в міських і сільських регіонах	92

	10
4.2 Приклади впровадження в Україні та Європі.....	94
4.3 Вимоги до обладнання операторів.....	95
4.4 Економічна доцільність: аналіз ТСО.....	97
4.5 Технічні виклики: сумісність зі старою інфраструктурою, інтеграція з мобільними мережами	99
Висновки до розділу 4.....	102
ВИСНОВКИ.....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	106

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення	Розшифрування (англ.)	Пояснення (укр.)
10G-EPON	10-Gigabit Ethernet Passive Optical Network	10-гігабітна пасивна оптична мережа Ethernet
25G-EPON	25-Gigabit Ethernet Passive Optical Network	25-гігабітна пасивна оптична мережа Ethernet
25G-PON	25-Gigabit Passive Optical Network	25-гігабітна пасивна оптична мережа
50G-EPON	50-Gigabit Ethernet Passive Optical Network	50-гігабітна пасивна оптична мережа Ethernet
50G-PON	50-Gigabit Passive Optical Network	50-гігабітна пасивна оптична мережа
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	Асиметрична цифрова абонентська лінія
ADSL2+	Asymmetric Digital Subscriber Line 2 Plus	Вдосконалена асиметрична цифрова абонентська лінія
AON	Active Optical Network	Активна оптична мережа
CAPEX	Capital Expenditures	Капітальні витрати
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation	Дічний розподіл смуги пропускання
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification	Стандарт передачі даних по коаксіальному кабелю
EPON	Ethernet Passive Optical Network	Пасивна оптична мережа на базі протоколу Ethernet
FBTF	Fused Bicolor Taper	Зварний розгалужувач (технологія виготовлення сплітерів)
FTTB	Fiber to the Building / Block	Архітектура мережі доступу з підведенням оптичного волокна до будівлі
FTTC	Fiber to the Curb / Cabinet	Архітектура мережі доступу з

Скорочення	Розшифрування (англ.)	Пояснення (укр.)
		підведенням оптичного волокна до шафи
FTTH	Fiber to the Home	Архітектура мережі доступу з підведенням оптичного волокна до помешкання абонента
FTTN	Fiber to the Node / Neighborhood	Архітектура мережі доступу з підведенням оптичного волокна до мережевого вузла
FTTO	Fiber to the Office	Архітектура мережі доступу з підведенням оптичного волокна до офісу
FTTx	Fiber to the x	Загальна концепція побудови архітектур оптичних мереж доступу з доведенням волокна до точки «х»
GE-PON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network	Гігабітна пасивна оптична мережа Ethernet
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network	Гігабітна пасивна оптична мережа
HFC	Hybrid Fiber-Coaxial	Гібридна волоконно-коаксіальна мережа
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Інститут інженерів з електротехніки та електроніки
IPTV	Internet Protocol Television	Цифрове інтерактивне телебачення за протоколом IP
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector	Сектор стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку
NG-PON2	Next-Generation Passive Optical Network 2	Пасивна оптична мережа наступного покоління з підтримкою

Скорочення	Розшифрування (англ.)	Пояснення (укр.)
NWDM	Narrow Wavelength Division Multiplexing	спектрального ущільнення Вузькосмугове спектральное ущільнення каналів
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer	Оптичний мультиплексор виділення/додавання каналів
ODN	Optical Distribution Network	Пасивна оптична розподільча мережа
OLT	Optical Line Terminal	Центральний оптичний лінійний термінал
ONT	Optical Network Terminal	Абонентський оптичний термінал
ONU	Optical Network Unit	Абонентський оптичний вузол
OPEX	Operating Expenditures	Операційні витрати
P2P	Point-to-Point	Мережева топологія «точка-точка»
P2MP	Point-to-Multipoint	Мережева топологія «точка- багатоточка»
PLC	Planar Lightwave Circuit	Планарний розгалужувач (технологія виготовлення сплітерів)
QoS	Quality of Service	Якість обслуговування
SLA	Service Level Agreement	Договір про рівень якості надання послуг
TCO	Total Cost of Ownership	Сукупна вартість володіння
TDM	Time Division Multiplexing	Мультиплексування з часовим розділенням каналів
TDMA	Time Division Multiple Access	Багатостанційний доступ із часовим розподіленням каналів
VDSL	Very high speed Digital Subscriber Line	Надвисокошвидкісна цифрова абонентська лінія
VDSL2	Very high speed Digital Subscriber Line 2	Надвисокошвидкісна цифрова абонентська лінія, друге покоління

Скорочення	Розшифрування (англ.)	Пояснення (укр.)
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Технологія спектрального ущільнення каналів (розділення за довжиною хвилі)
xDSL	Digital Subscriber Line	Загальне сімейство технологій цифрової абонентської лінії

ВСТУП

Сучасні телекомунікаційні мережі швидко розвиваються через зростання потреб користувачів у стабільному та швидкому доступі до інтернету. Сьогодні через мережу передаються великі обсяги даних: відео високої якості, хмарні сервіси, онлайн-навчання, відеоконференції, дані систем відеоспостереження та пристроїв інтернету речей. Через це старі технології доступу на основі мідних ліній уже не завжди можуть забезпечити потрібну швидкість і якість зв'язку.

Одним із найбільш перспективних рішень є використання оптоволоконних мереж доступу. Оптичне волокно має високу пропускну здатність, малі втрати сигналу, стійкість до електромагнітних завад і великий запас для подальшої модернізації. Саме тому оператори зв'язку поступово переходять від xDSL, HFC та інших застарілих рішень до технологій FTTx, зокрема FTTH, FTTB і FTTC.

Актуальність теми полягає в тому, що існує кілька технологій побудови оптоволоконних мереж доступу, і кожна з них має свої переваги та недоліки. GPON залишається поширеним і економічно вигідним рішенням для масового підключення абонентів. XGS-PON забезпечує вищу симетричну швидкість і краще підходить для сучасних сервісів. EPON і 10G-EPON є важливими для Ethernet-орієнтованих мереж. Перспективні технології 25G-PON, 50G-PON і 50G-EPON можуть застосовуватися в мережах із високим навантаженням.

Об'єктом дослідження є оптоволоконні мережі доступу.

Предметом дослідження є технології побудови оптоволоконних мереж доступу, їхні технічні характеристики, архітектури та критерії порівняння.

Метою роботи є порівняльний аналіз технологій побудови оптоволоконних мереж доступу та визначення умов, за яких доцільно застосовувати ту чи іншу технологію.

Для досягнення мети потрібно виконати такі завдання:

1. Розглянути розвиток мереж доступу від мідних технологій до оптоволоконних рішень.
2. Описати основні архітектури FTTx.

3. Проаналізувати активні та пасивні оптоволоконні мережі доступу.
4. Розглянути стандарти GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON, 25G-EPON і 50G-EPON.
5. Порівняти технології за швидкістю, дальністю, вартістю, масштабованістю, енергоспоживанням, надійністю та підтримкою QoS.
6. Розглянути практичні аспекти впровадження оптоволоконних мереж у міських і сільських регіонах.
7. Сформулювати рекомендації щодо вибору технології для різних сценаріїв побудови мережі доступу.

У роботі використовуються методи аналізу технічної літератури, вивчення міжнародних стандартів ITU-T та IEEE, порівняльний аналіз характеристик технологій і узагальнення практичних підходів до побудови мереж доступу.

Практичне значення роботи полягає в тому, що її результати можуть бути використані для попереднього вибору технології побудови оптоволоконної мережі доступу залежно від умов розгортання, вимог до швидкості та економічної доцільності.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел. У першому розділі розглянуто загальні поняття оптоволоконних мереж доступу. У другому розділі описано технічні принципи їх побудови. У третьому розділі виконано порівняльний аналіз технологій. У четвертому розділі розглянуто практичні аспекти впровадження таких мереж.

1 ОГЛЯД ОПТОВОЛОКОННИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

1.1 Еволюція мереж доступу: від мідних технологій до оптоволокна

Мережі доступу завжди були однією з найважливіших частин телекомунікаційної інфраструктури, тому що саме вони з'єднують кінцевого користувача з мережею оператора. Якщо магістральна мережа відповідає за передавання великих обсягів трафіку між містами, країнами або вузлами оператора, то мережа доступу працює ближче до абонента. Саме від цієї ділянки часто залежить фактична швидкість інтернету, стабільність з'єднання, затримка сигналу та якість послуг.

На ранніх етапах розвитку широкосмтового доступу основою абонентських підключень були мідні кабельні лінії. Це було логічно, оскільки телефонна інфраструктура вже існувала, і операторам не потрібно було повністю будувати нову кабельну мережу. На базі телефонних пар почали активно використовуватися технології сімейства xDSL. Найбільш відомими серед них стали ADSL, ADSL2+, VDSL і VDSL2. Їхня головна перевага полягала в тому, що вони дозволяли передавати цифрові дані через уже прокладені телефонні лінії.

Проте мідні технології мали і суттєві обмеження. Якість зв'язку сильно залежала від довжини кабельної лінії, стану кабелю, кількості з'єднань, рівня завад і перехресних наведень між парами. Чим далі абонент знаходився від обладнання оператора, тим нижчою ставала реальна швидкість передавання даних. Для звичайного перегляду вебсторінок або роботи з електронною поштою цього було достатньо, але з розвитком відеосервісів, онлайн-ігор, хмарних платформ і віддаленої роботи можливостей xDSL поступово стало не вистачати.

Окремим напрямом розвитку були гібридні волоконно-коаксіальні мережі, або HFC. У таких мережах оптичне волокно підводиться до певного вузла, а далі сигнал до абонентів передається коаксіальним кабелем. Цей підхід довгий час використовувався операторами кабельного телебачення, які поступово почали надавати ще й послуги доступу до інтернету. Перевагою HFC була можливість використати вже побудовану кабельну інфраструктуру, але така мережа також

мала спільне середовище передавання, тому швидкість і якість доступу залежали від кількості активних користувачів у сегменті.

З розвитком стандартів DOCSIS можливості HFC-мереж значно покращилися. Наприклад, сучасні версії DOCSIS можуть забезпечувати досить високі швидкості у низхідному напрямку. Проте навіть при цьому коаксіальна ділянка має фізичні обмеження, а модернізація такої мережі часто потребує значних витрат. Крім того, для нових сервісів дедалі важливішою стає не тільки швидкість завантаження, а й висока швидкість передавання даних від абонента до мережі, тобто у висхідному напрямку. Саме тут оптоволоконні рішення мають суттєву перевагу.

Перехід до оптичного волокна був поступовим. Спочатку волоконно-оптичні лінії активно використовувалися переважно в магістральних і транспортних мережах, де потрібно було передавати великі обсяги трафіку на значні відстані. Потім оптика почала наближатися до рівня доступу: спочатку до районних вузлів, потім до будівель, вуличних шаф і зрештою безпосередньо до квартир або приватних будинків. Саме так сформувався загальний напрям FTTx, тобто “fiber to the x”, де “x” означає конкретну точку, до якої підводиться оптичне волокно.

Основними варіантами FTTx є FTTC, FTTB, FTTH і FTTO. У випадку FTTC волокно підводиться до вуличної шафи або вузла поблизу абонентів, а остання ділянка може залишатися мідною. У варіанті FTTB оптичне волокно доходить до будинку, а всередині будівлі підключення може виконуватися за допомогою Ethernet-кабелю або іншої внутрішньої інфраструктури. FTTH передбачає підведення оптичного волокна безпосередньо до помешкання абонента. FTTO зазвичай використовується для офісних або корпоративних підключень, коли волокно підводиться до робочого місця або офісного обладнання [4].

Найбільш перспективним варіантом вважається FTTH, оскільки в такій архітектурі майже повністю усувається залежність від мідної ділянки. Це дає змогу забезпечити високу швидкість, кращу стабільність і більший запас для майбутньої модернізації. Якщо в мережі вже прокладено якісну оптичну розподільчу інфраструктуру, оператор може з часом переходити від GPON до

XGS-PON або інших новіших стандартів, не змінюючи всю кабельну частину мережі. Рекомендація ITU-T G.984.1 описує GPON як гнучку оптичну мережу доступу для житлових і бізнес-послуг із номінальними швидкостями 2,4 Гбіт/с у низхідному напрямку та 1,2 або 2,4 Гбіт/с у висхідному напрямку, що показує перехід від мегабітного до гігабітного рівня доступу (ITU).

Поява пасивних оптичних мереж стала важливим етапом у розвитку доступу. У PON-мережах між центральним обладнанням оператора та абонентами використовуються пасивні оптичні сплітери. Вони розділяють оптичний сигнал між кількома користувачами без потреби в електроживленні на проміжній ділянці. Такий підхід дозволяє зменшити кількість активного обладнання в польових умовах, знизити витрати на обслуговування та підвищити надійність мережі.

Перші масові PON-рішення були орієнтовані на надання інтернету, телефонії та IPTV. Згодом вимоги змінилися: абоненти почали активніше використовувати відео високої якості, хмарні сховища, відеоконференції, онлайн-сервіси та системи “розумного дому”. Для бізнес-клієнтів важливими стали симетричні канали, гарантована якість обслуговування та висока надійність. Через це виникла потреба у швидших технологіях, таких як XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, 25G-EPON і 50G-EPON.

XGS-PON є прикладом подальшого розвитку пасивних оптичних мереж. Згідно з ITU-T G.9807.1, ця технологія підтримує номінальну швидкість 10 Гбіт/с як у низхідному, так і у висхідному напрямках і може використовуватися для побутових, корпоративних, мобільних транспортних та інших застосувань. Це важливо, тому що сучасна мережа доступу вже не обслуговує лише домашній інтернет. Вона також може використовуватися для підключення офісів, базових станцій мобільного зв'язку, камер відеоспостереження, промислових контролерів та IoT-пристроїв.

Паралельно з технологіями, які стандартизуються ITU-T, розвивається напрям Ethernet PON. Він базується на ідеї використання Ethernet у мережах доступу, що спрощує інтеграцію з IP-мережами оператора. Новіші стандарти IEEE, зокрема IEEE 802.3ca, пов'язані з розвитком 25G-EPON і 50G-EPON. Такі

технології орієнтовані на ще більшу пропускну здатність і можуть застосовуватися там, де потрібно обслуговувати високі навантаження або забезпечувати перспективу модернізації мережі [5].

Якщо порівнювати мідні, коаксіальні та оптоволоконні мережі, то головна різниця полягає в потенціалі розвитку. Мідні лінії можна покращувати за рахунок нових методів модуляції, скорочення довжини абонентської ділянки або використання векторизації, але фізичні властивості кабелю все одно обмежують максимальну швидкість і дальність. Коаксіальні мережі також можуть модернізуватися, але вони залишаються залежними від особливостей спільного середовища передавання. Оптичне волокно має значно більший запас пропускну здатності, тому краще підходить для довгострокового розвитку [20].

Важливо також враховувати, що розвиток мереж доступу пов'язаний не лише з технічними параметрами. На практиці оператори приймають рішення з урахуванням економіки проєкту. Побудова FTTH-мережі може бути дорожчою на початковому етапі, але така інфраструктура має довший термін використання і кращі можливості для оновлення. У багатоповерховій забудові вартість підключення одного абонента може бути нижчою через високу щільність користувачів. У сільській місцевості ситуація складніша, оскільки відстані більші, а кількість потенційних абонентів на один кілометр мережі менша.

Таким чином, еволюція мереж доступу від мідних технологій до оптоволокна була викликана не одним окремим фактором, а цілою групою причин. Серед них можна виділити зростання трафіку, розвиток цифрових сервісів, потребу у стабільному з'єднанні, появу IoT-пристроїв, збільшення вимог до швидкості у висхідному напрямку та необхідність створення інфраструктури з великим запасом на майбутнє. Саме тому оптоволоконні мережі доступу сьогодні розглядаються як основний напрям розвитку фіксованого широкосмугового доступу.



Рисунок 1.1 – Еволюція мереж доступу від мідних технологій до оптоволоконних рішень

Мідні та коаксіальні технології відіграли важливу роль у розвитку масового інтернет-доступу, але сучасні вимоги поступово змістили акцент у бік оптичного волокна. Саме оптоволоконні мережі дають можливість будувати інфраструктуру, яка може підтримувати не тільки поточні послуги, а й майбутні сервіси з набагато вищими вимогами до швидкості, затримки та надійності.

1.2 Базові поняття архітектури оптоволоконних мереж доступу: FTTx

Архітектура оптоволоконної мережі доступу показує, як саме оптичне волокно підводиться від обладнання оператора до кінцевого користувача. У загальному вигляді для цього використовується поняття FTTx, тобто *Fiber to the x*. У цьому скороченні літера x означає певну точку, до якої доходить оптична лінія: будинок, квартира, офіс, вулична шафа або інший вузол доступу.

FTTx не є однією конкретною технологією. Це швидше загальна група архітектур, які відрізняються тим, наскільки близько оптичне волокно підходить до абонента. Чим ближче волокно до користувача, тим менше залишається ділянок на основі мідного кабелю або іншого середовища передавання. Від цього залежить швидкість, стабільність роботи мережі, можливість модернізації та загальна якість послуг.

За визначенням FTTH Council, FTTx є загальним терміном для випадків, коли оптичне волокно замінює мідну інфраструктуру в мережі доступу. У цьому ж документі окремо виділяються FTTH і FTTB, де волокно закінчується відповідно в житлі абонента або в будівлі. Це важливо, тому що в різних країнах і в різних операторів можуть використовуватися схожі терміни, але фактична схема підключення може відрізнятися.

Найпоширенішими варіантами FTTx є FTTC, FTTB, FTTH і FTTO. Кожна з цих архітектур має свою сферу застосування. Вибір конкретного варіанта залежить від типу забудови, щільності абонентів, вартості будівництва, наявної інфраструктури та вимог до швидкості [4].

FTTC означає *Fiber to the Curb* або *Fiber to the Cabinet*. У цьому випадку оптичне волокно підводиться не прямо до будинку чи квартири, а до вуличної шафи або вузла, який знаходиться відносно близько до групи абонентів. Від цієї шафи до користувача може використовуватися мідний кабель, наприклад телефонна пара або Ethernet-лінія. Такий підхід дає можливість скоротити довжину мідної ділянки й підвищити швидкість порівняно зі звичайним xDSL, але повністю проблему обмежень міді він не вирішує.

FTTC можна вважати проміжним варіантом між старими мідними мережами та повноцінною оптичною мережею до абонента. Його перевага полягає в тому, що оператор може використати частину вже наявної інфраструктури й не прокладати одразу волокно до кожної квартири або приватного будинку. Але недоліком є те, що остання ділянка все одно залишається залежною від мідного кабелю. Через це якість з'єднання може змінюватися залежно від довжини лінії, стану кабелю та зовнішніх завад.

FTTB розшифровується як *Fiber to the Building*, тобто “волокно до будівлі”. У такій архітектурі оптична лінія підводиться до багатоквартирного будинку, офісної будівлі або іншого об'єкта. Далі всередині будівлі сигнал розподіляється між користувачами за допомогою Ethernet-кабелю, комутаторів або іншої внутрішньої мережевої інфраструктури.

FTTB часто використовується в багатоповерховій забудові, тому що дає можливість підключити велику кількість абонентів через одну оптичну лінію до будинку. Для оператора це може бути економічно вигідним, оскільки витрати на прокладання волокна розподіляються між багатьма користувачами. Водночас така схема потребує активного обладнання всередині будівлі. Це означає, що потрібно забезпечити електроживлення, місце для встановлення обладнання, захист від несанкціонованого доступу та обслуговування комутаторів.

Перевагою FTTB є відносно невисока вартість підключення одного абонента в умовах багатоквартирної забудови. Недоліком є те, що якість мережі всередині будинку залежить не тільки від оптичної магістралі, а й від стану внутрішньої кабельної системи та активного обладнання. Якщо будинкова мережа побудована неякісно або використовує застарілі комутатори, це може обмежувати фактичну швидкість для абонентів.

FTTH означає *Fiber to the Home*, тобто “волокно до житла”. У цьому випадку оптичне волокно підводиться безпосередньо до квартири, приватного будинку або приміщення абонента. Саме FTTH вважається найбільш перспективною архітектурою для довгострокового розвитку фіксованого широкосмугового доступу, тому що вона майже повністю усуває залежність від мідної ділянки.

Головна перевага FTTH полягає в тому, що абонент отримує прямий доступ до оптичної інфраструктури. Це забезпечує високу швидкість, стабільність сигналу та кращу готовність мережі до майбутньої модернізації. Якщо оператор побудував якісну оптичну розподільчу мережу, то в майбутньому можна переходити на нові стандарти PON, наприклад із GPON на XGS-PON, без повної заміни кабельної частини. Рекомендація ITU-T G.984.1 описує GPON як гігабітну пасивну оптичну мережу доступу, а ITU-T G.9807.1 визначає XGS-PON як 10-гігабітну симетричну пасивну оптичну систему для побутових, бізнесових, мобільних транспортних та інших застосувань.

FTTH добре підходить як для приватного сектору, так і для нових житлових комплексів. Однак його впровадження може бути дорожчим на початковому етапі,

особливо якщо потрібно прокласти волокно до кожного окремого будинку або квартири. У старій забудові також можуть виникати складнощі з доступом до кабельних каналів, стояків, технічних приміщень і розведення всередині будинків. Але з технічної точки зору FTTN має найбільший запас для розвитку.

FTTO означає *Fiber to the Office*. Цей варіант зазвичай використовується для офісних, корпоративних або промислових об'єктів. У такій архітектурі оптичне волокно підводиться безпосередньо до офісу, робочої зони або обладнання підприємства. FTTO важливий там, де потрібна висока надійність, стабільна швидкість, підтримка корпоративних сервісів, відеоконференцій, хмарних систем, IP-телефонії та захищеного доступу до внутрішніх ресурсів.

На відміну від звичайного домашнього підключення, корпоративні користувачі часто мають вищі вимоги до якості обслуговування. Для них важлива не тільки максимальна швидкість, а й гарантована пропускну здатність, мала затримка, резервування, контроль доступу та підтримка SLA. Тому FTTO може будуватися як на базі PON, так і на базі активних Ethernet-рішень, залежно від вимог замовника.

Окремо варто згадати архітектуру FTTN, тобто *Fiber to the Node*. У цьому випадку оптичне волокно підводиться до певного мережевого вузла, який може обслуговувати досить велику територію. Далі до абонентів використовується інша інфраструктура, найчастіше мідна. FTTN є менш “оптичною” архітектурою порівняно з FTTN або FTTB, але вона може застосовуватися як перехідний етап модернізації мережі. Для кращого розуміння відмінностей між архітектурами FTTx їх доцільно подати у вигляді короткого порівняння.

Основні варіанти архітектури FTTx наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні варіанти архітектури FTTx

Архітектура	Точка підведення оптичного волокна	Особливості застосування
FTTN	До мережевого вузла	Використовується як проміжний варіант модернізації старих мереж
FTTC	До вуличної шафи або вузла біля абонентів	Дозволяє скоротити довжину мідної ділянки

Продовження таблиці 1.1

FTTB	До будівлі	Поширений варіант для багатоквартирних будинків
FTTH	До квартири або приватного будинку	Найперспективніший варіант для швидкісного доступу
FTTO	До офісу або робочої зони	Застосовується для корпоративних і бізнес-підключень

З технічної точки зору архітектура FTTx складається з кількох основних частин. До них належать центральний вузол оператора, магістральна або фідерна оптична ділянка, розподільча мережа, абонентська ділянка та кінцеве обладнання користувача. У пасивних оптичних мережах важливу роль відіграє ODN, тобто *Optical Distribution Network*. Вона включає оптичні кабелі, з'єднувачі, муфти, кроси, сплітери та інші пасивні елементи.

На стороні оператора встановлюється обладнання OLT - *Optical Line Terminal*. Воно керує передаванням даних у пасивній оптичній мережі, взаємодіє з транспортною мережею оператора та обслуговує групу абонентських пристроїв. На стороні абонента встановлюється ONT або ONU. Цей пристрій приймає оптичний сигнал і перетворює його у формат, зручний для підключення домашнього роутера, комп'ютера, телефонії або іншого обладнання.

У PON-архітектурі одна оптична лінія від OLT може розділятися між багатьма абонентами за допомогою оптичного сплітера. Наприклад, один порт OLT може обслуговувати 32, 64 або більше абонентів залежно від стандарту, оптичного бюджету та політики оператора. Це дозволяє зменшити кількість волокон, які потрібно прокладати від центрального вузла, і зробити мережу економічно вигіднішою для масового підключення [21].

Також важливо враховувати можливість модернізації. Наприклад, якщо оператор будує мережу за принципом FTTH із якісною ODN, у майбутньому він може перейти на нові покоління PON без повної перебудови фізичної інфраструктури. Це особливо актуально через те, що стандарти оптичного доступу продовжують розвиватися. FTTH Handbook зазначає, що волоконно-оптична мережа охоплює всі етапи - від планування й проєктування до

будівництва та експлуатації, а також включає як пасивне, так і активне обладнання.

У підсумку можна сказати, що FTTx є основою для розуміння сучасних оптоволоконних мереж доступу. Саме архітектура визначає, де закінчується оптична ділянка, яке обладнання потрібно встановити, які швидкості реально забезпечити та наскільки складною буде подальша модернізація. Найбільш перспективною з погляду майбутнього розвитку є FTTH, але на практиці оператори можуть використовувати різні варіанти FTTx залежно від технічних і економічних умов.

1.3 Загальний огляд пасивних та активних оптоволоконних мереж доступу

Після розгляду архітектур FTTx потрібно окремо пояснити, яким способом може будуватися сама оптична мережа доступу. На практиці оптоволоконні мережі поділяють на два основні типи: пасивні оптичні мережі та активні оптичні мережі. Обидва варіанти використовують оптичне волокно, але відрізняються принципом розподілу сигналу, складом обладнання, вартістю експлуатації та можливостями керування трафіком.

Пасивна оптична мережа, або PON (*Passive Optical Network*), будується за принципом “точка - багато точок”. Це означає, що один порт обладнання оператора може обслуговувати групу абонентів. Для розподілу сигналу між ними використовуються пасивні оптичні сплітери [1].

У типовій PON-мережі на стороні оператора встановлюється OLT (*Optical Line Terminal*), а на стороні користувача - ONT або ONU. Між ними знаходиться оптична розподільча мережа ODN, до складу якої входять оптичні кабелі, муфти, кроси, конектори, сплітери та інші пасивні елементи. OLT керує передаванням даних, розподіляє ресурси між абонентами та підключає мережу доступу до транспортної мережі оператора.

Основна перевага PON полягає в тому, що між вузлом оператора та абонентами немає активного обладнання, яке потрібно живити електроенергією. Це зменшує витрати на експлуатацію, спрощує обслуговування і підвищує надійність мережі. Наприклад, якщо в розподільчій ділянці немає комутаторів або підсилювачів, то менше елементів можуть вийти з ладу через проблеми з живленням, перегріванням або зовнішніми умовами.

Ще однією перевагою PON є економне використання оптичного волокна. Один оптичний порт OLT може через сплітер обслуговувати кілька десятків абонентів. У масових мережах часто використовуються коефіцієнти розгалуження 1:32 або 1:64, хоча конкретне значення залежить від стандарту, оптичного бюджету, відстані до абонентів і політики оператора. Такий підхід знижує кількість волокон, які потрібно прокладати від центрального вузла, і робить мережу вигіднішою для масового підключення.

Разом із цим PON має і певні обмеження. Оскільки кілька абонентів спільно використовують один ресурс порту OLT, пропускна здатність ділиться між ними. Це не означає, що всі користувачі постійно отримують однакову частину швидкості, але оператор повинен правильно планувати навантаження, щоб уникнути перевантаження сегмента. Також важливо правильно розрахувати оптичний бюджет, тому що кожен сплітер, з'єднання і метр кабелю вносить певні втрати сигналу [4].

У низхідному напрямку, тобто від OLT до абонентів, дані передаються загальним потоком. Кожен ONT отримує цей потік, але обробляє тільки ті дані, які призначені саме йому. У висхідному напрямку, тобто від абонентів до OLT, передавання організовується за часовим принципом. Кожен абонентський пристрій передає дані у свій часовий інтервал, щоб сигнали різних користувачів не накладалися один на одного. Через це в PON важливими є механізми синхронізації та динамічного розподілу смуги пропускання.

Найвідомішими технологіями пасивного оптичного доступу є GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON, 25G-EPON і 50G-EPON. Вони розвивалися поступово: від гігабітних систем до 10-гігабітних і ще швидших

рішень. Наприклад, ITU-T G.984.1 визначає загальні характеристики GPON як гігабітної пасивної оптичної мережі, а ITU-T G.9807.1 описує XGS-PON як 10-гігабітну симетричну пасивну оптичну мережу для житлових, бізнесових, мобільних транспортних та інших застосувань.

Окремо розвивається напрям Ethernet PON, який стандартизується IEEE. До нього належать EPON, 10G-EPON, 25G-EPON і 50G-EPON. Наприклад, IEEE 802.3sa пов'язаний із розвитком 25G/50G-EPON, тобто технологій, які орієнтовані на вищу пропускну здатність і подальшу модернізацію вже побудованої PON-інфраструктури. За даними CableLabs, для 25G/50G-EPON важливою вимогою була робота на вже розгорнутій PON-інфраструктурі з типовим радіусом до 20 км і збереженням логіки попередніх поколінь EPON.

Активна оптична мережа, або AON (*Active Optical Network*), будується за іншим принципом. У такій мережі між вузлом оператора та абонентами встановлюється активне обладнання, найчастіше Ethernet-комутатори. Кожен абонент або група абонентів підключається через окремий порт активного пристрою. На відміну від PON, де сигнал розділяється пасивним сплітером, в AON розподіл трафіку виконується електронним обладнанням.

Перевагою активної оптичної мережі є кращий контроль над трафіком. Оператор може простіше виділяти окремі порти, налаштовувати VLAN, контролювати швидкість, виконувати діагностику, ізолювати проблемні ділянки та надавати гарантовані послуги для окремих абонентів. Через це AON може бути зручним рішенням для бізнес-клієнтів, офісних центрів, кампусів, промислових об'єктів або ситуацій, де потрібно забезпечити індивідуальне керування кожним підключенням.

Ще однією перевагою AON є те, що абонент може отримати більш виділений канал порівняно з класичною PON-мережею. У PON ресурс порту OLT спільно використовується групою абонентів, а в активній Ethernet-архітектурі кожне підключення може бути організоване окремим портом комутатора. Це спрощує планування якості обслуговування, особливо для корпоративних користувачів, яким потрібні стабільні параметри каналу.

Проте активні мережі мають і суттєві недоліки. Головний із них - потреба в електроживленні активного обладнання в проміжних вузлах. Якщо комутатор встановлений у будинку, шафі або технічному приміщенні, потрібно забезпечити живлення, захист від перепадів напруги, охолодження, фізичну безпеку та регулярне обслуговування. Це збільшує експлуатаційні витрати та створює додаткові точки відмови.

Також активна мережа може вимагати більшої кількості обладнання в польових умовах. Якщо пасивна PON-мережа може працювати з мінімальною кількістю активних елементів між OLT і ONT, то AON фактично переносить частину активної інфраструктури ближче до абонента. У міських умовах це може бути прийнятним, особливо в багатоквартирних будинках або бізнес-центрах. Але в сільській місцевості або на великих відстанях така схема може бути менш вигідною через витрати на живлення й обслуговування.

Порівняння пасивних та активних оптоволоконних мереж наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння пасивних та активних оптоволоконних мереж

Критерій	Пасивна мережа PON	Активна мережа AON
Принцип побудови	Один порт OLT обслуговує групу абонентів через сплітери	Кожен абонент або група абонентів підключається через активне обладнання
Проміжне обладнання	Пасивні сплітери без живлення	Комутатори або інші активні пристрої
Електроживлення в розподільчій ділянці	Не потрібне	Потрібне
Вартість експлуатації	Нижча	Вища
Керування окремим абонентом	Менш гнучке	Більш гнучке
Основне застосування	Масовий FTTH-доступ	Бізнес-центри, кампуси, корпоративні мережі

На практиці вибір між пасивною та активною мережею залежить не тільки від технічних характеристик. Важливу роль відіграють економічні умови, щільність абонентів, тип забудови, наявність місць для встановлення обладнання, вимоги до резервування, доступність електроживлення та стратегія розвитку

оператора. Наприклад, для масового FTTH-підключення в житловому секторі оператори часто обирають PON. Для офісного центру або промислового об'єкта може бути доцільнішим активний Ethernet, тому що він дає більше можливостей для керування окремими підключеннями.

У свою чергу, активні мережі модернізуються переважно через заміну комутаторів, оптичних модулів і портів доступу. Це може бути простіше в окремих будівлях або кампусах, але складніше в розподіленій мережі з великою кількістю активних вузлів. Тому AON виглядає сильним рішенням для локалізованих об'єктів, але не завжди є найкращим варіантом для широкого масового розгортання на великій території.

Важливо розуміти, що пасивні та активні мережі не слід розглядати як повністю протилежні або взаємовиключні рішення. У реальних операторських мережах вони можуть поєднуватися.

Пасивні та активні оптоволоконні мережі доступу мають різну логіку побудови. PON орієнтована на простоту розподільчої інфраструктури, меншу кількість активного обладнання та економічне масове підключення абонентів. AON більше підходить для сценаріїв, де потрібне індивідуальне керування каналами, гнучке адміністрування й кращий контроль за трафіком. Для подальшого порівняльного аналізу важливо враховувати обидва підходи, оскільки саме вони формують основу сучасних оптоволоконних мереж доступу.

Висновки до розділу 1

У першому розділі встановлено, що перехід від мідних і коаксіальних мереж до оптоволоконного доступу обумовлений зростанням трафіку, потребою у стабільній швидкості та вимогами сучасних цифрових сервісів. Розглянуті архітектури FTTh підтвердили, що FTTH забезпечує найкращий технічний запас для подальшої модернізації, а FTTB і FTTC залишаються практичними рішеннями для використання наявної інфраструктури.

Порівняння PON і AON показало, що пасивні мережі ефективні для масового абонентського підключення завдяки меншій кількості активного обладнання в розподільчій ділянці. Активні мережі забезпечують точніше керування окремими каналами, тому вони підходять для корпоративних і локальних об'єктів із підвищеними вимогами до адміністрування.

2 ТЕХНІЧНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ОПТОВОЛОКОННИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

2.1 Топологія оптоволоконних мереж доступу

Топологія мережі показує, як саме з'єднані між собою основні елементи телекомунікаційної інфраструктури. Для оптоволоконних мереж доступу це дуже важливо, тому що від обраної топології залежать вартість будівництва, складність обслуговування, надійність, можливість масштабування та якість послуг для абонентів. Навіть якщо оператор використовує сучасну технологію передавання, наприклад GPON або XGS-PON, неправильно спроектована топологія може створити обмеження для подальшого розвитку мережі.

У загальному вигляді оптоволоконна мережа доступу складається з центрального вузла оператора, фідерної ділянки, розподільчої ділянки, абонентської ділянки та кінцевого обладнання користувача. На стороні оператора встановлюється OLT, тобто оптичний лінійний термінал. Далі сигнал передається через оптичну розподільчу мережу ODN, яка включає кабелі, муфти, оптичні кроси, сплітери, конектори та інші пасивні елементи. На стороні абонента встановлюється ONU або ONT.

Основна задача топології полягає в тому, щоб забезпечити ефективне з'єднання між OLT і абонентськими пристроями. При цьому потрібно враховувати не лише фізичну відстань, а й оптичний бюджет, кількість абонентів, можливість резервування, доступність кабельної каналізації, тип забудови та перспективи підключення нових користувачів. У реальних мережах ці фактори часто важливіші, ніж сама теоретична швидкість стандарту.

Найпростішою топологією є з'єднання “точка - точка”, або Point-to-Point. У такій схемі кожен абонент має окреме оптичне волокно або окремий канал від обладнання оператора. Це дає хорошу якість з'єднання, зрозумілу структуру мережі та можливість надати користувачу фактично виділений канал. Така топологія часто використовується в активних Ethernet-мережах, корпоративних

підключеннях, офісних центрах або для абонентів із підвищеними вимогами до якості зв'язку.

Перевагою Point-to-Point є простіша ізоляція абонентів один від одного. Якщо виникає проблема на лінії одного користувача, вона не впливає на інших абонентів. Також оператору легше контролювати швидкість, VLAN, політики доступу та параметри обслуговування для кожного підключення. Але недоліком є більша витрата оптичного волокна і портів активного обладнання. Якщо потрібно підключити багато абонентів, така схема може бути дорожчою порівняно з PON.

Для масових мереж доступу значно частіше використовується топологія “точка - багато точок”, або Point-to-Multipoint. Саме вона є типовою для пасивних оптичних мереж PON. У цій схемі один порт OLT через пасивний оптичний сплітер обслуговує групу абонентів. Наприклад, один порт може бути розділений на 32 або 64 користувачі, якщо це дозволяє оптичний бюджет і проєктна модель мережі.

Топологія Point-to-Multipoint є економічно вигідною для масового підключення, тому що дозволяє зменшити кількість волокон і портів OLT. У PON-мережі немає потреби прокладати окреме волокно від центрального вузла до кожного абонента.

Порівняння топологій “точка - точка” та “точка - багато точок” наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння топологій “точка - точка” та “точка - багато точок”

Критерій	Точка - точка	Точка - багато точок
Принцип підключення	Окрема лінія до кожного абонента	Один порт OLT обслуговує групу абонентів
Типова технологія	Active Ethernet	PON
Витрата волокна	Вища	Нижча
Керування абонентом	Більш індивідуальне	Групове через PON-сегмент
Вартість масового розгортання	Вища	Нижча
Доцільне застосування	Бізнес, корпоративні підключення	Масовий житловий доступ

У пасивних мережах доступу важливе значення має схема розміщення сплітерів. Найпростішим варіантом є одноетапне розгалуження, коли один сплітер встановлюється між OLT і групою абонентів. Наприклад, може використовуватися сплітер 1:32, який одразу розподіляє сигнал між 32 абонентськими лініями. Така схема є відносно простою для розуміння та обслуговування, але вона не завжди зручна для великої території або складної забудови.

Іншим варіантом є каскадне розгалуження. У цьому випадку використовується кілька рівнів сплітерів. Наприклад, спочатку сигнал ділиться у співвідношенні 1:4, а потім кожна гілка додатково ділиться через сплітери 1:8. У результаті загальний коефіцієнт розгалуження також може становити 1:32. Перевага каскадної схеми полягає в тому, що вона дозволяє гнучкіше розподіляти волокна по території та краще адаптувати мережу до реальної забудови. Недоліком є складніше планування і більша кількість точок з'єднання, які впливають на втрати сигналу.

Під час проєктування PON важливо правильно розрахувати оптичний бюджет. Кожен елемент мережі створює втрати: оптичний кабель має загасання на кілометр, конектори й зварні з'єднання додають власні втрати, а сплітер вносить найбільше загасання. Чим більший коефіцієнт розгалуження, тим більше втрачається оптична потужність. Тому не можна просто збільшувати кількість абонентів на один порт OLT без розрахунку. Якщо втрати перевищать допустимий рівень, ONT може працювати нестабільно або взагалі не встановити з'єднання [1].

Для міської багатоповерхової забудови часто зручно використовувати варіант, коли фідерне волокно підводиться до будинку або групи будинків, а сплітер встановлюється в підвальному приміщенні, телекомунікаційній шафі або на вузлі розподілу. Далі окремі абонентські волокна підводяться до квартир. Така схема дозволяє зменшити довжину абонентських відгалужень і спростити підключення мешканців.

У приватному секторі ситуація складніша. Будинки можуть бути розташовані на значній відстані один від одного, тому довжина кабельних ділянок збільшується. У такому випадку оператору потрібно уважніше планувати місця

встановлення муфт і сплітерів, щоб не перевищити оптичний бюджет і водночас не прокладати зайві волокна. Для таких сценаріїв каскадне розгалуження може бути зручнішим, оскільки дозволяє поступово розподіляти мережу вздовж вулиць.

Окрім деревоподібної структури, в оптоволоконних мережах можуть використовуватися кільцеві топології. Вони частіше застосовуються не на самому абонентському рівні, а на рівні агрегації або підключення вузлів доступу. Основна перевага кільця полягає в можливості резервування. Якщо на одній ділянці кабелю виникає пошкодження, трафік може бути перенаправлений в інший бік кільця. Це підвищує надійність мережі, особливо для важливих об'єктів, бізнес-клієнтів або базових станцій мобільного зв'язку.

Для звичайного FTTH-підключення повне кільцеве резервування до кожного абонента використовується рідко, тому що це суттєво підвищує вартість будівництва. Але для вузлів агрегації, районних OLT або великих корпоративних клієнтів кільцева топологія може бути виправданою. У цьому випадку резервування забезпечує не тільки стабільність доступу до інтернету, а й безперервність роботи критичних сервісів.

Також у мережах доступу може використовуватися зіркоподібна топологія. Вона характерна для активних Ethernet-мереж, де від комутатора до кожного абонента або групи абонентів прокладається окрема лінія. Така схема зручна для адміністрування, але потребує більше портів і кабельних ресурсів. У багатоквартирних будинках вона може реалізовуватися через будинковий комутатор, від якого окремі Ethernet-лінії йдуть до квартир.

Зіркоподібна топологія добре підходить для випадків, коли потрібно мати окреме керування кожним підключенням. Наприклад, в офісному центрі можна підключити різних орендарів до окремих портів комутатора, налаштувати для них різні швидкості, VLAN і політики безпеки. Але в пасивних FTTH-мережах така структура менш поширена, тому що PON економічніше вирішує задачу масового підключення.

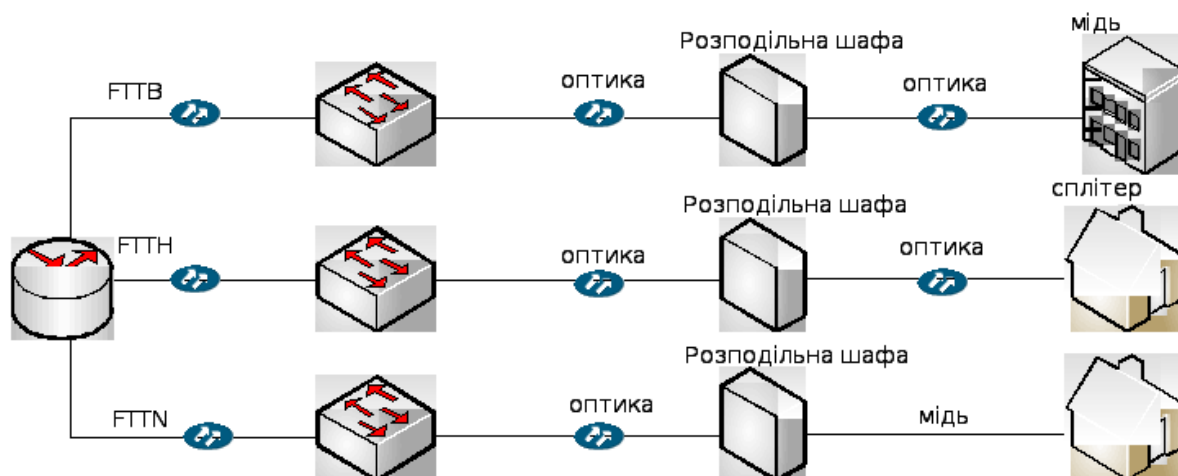


Рисунок 2.1 – Основні топології оптоволоконних мереж доступу

Окрему роль відіграє топологія WDM-PON та наступних поколінь PON. У таких системах різні абоненти або групи абонентів можуть використовувати різні довжини хвиль. Це дозволяє збільшити пропускну здатність і краще розділяти ресурси мережі. Наприклад, у системах NG-PON2 використовується підхід TWDM, тобто поєднання часового та хвильового мультиплексування. ITU-T G.989.3 зазначає, що система NG-PON2 може містити набір TWDM-каналів, PtP WDM-каналів або обидва варіанти, що дає гнучкість для розвитку оптичного доступу.

З погляду майбутнього розвитку топологія має забезпечувати не тільки поточну роботу мережі, а й можливість модернізації. Наприклад, якщо оператор сьогодні будує GPON, але в майбутньому планує перехід на XGS-PON або 50G-PON, потрібно одразу враховувати якість волокна, довжину ліній, кількість з'єднань, типи сплітерів і запас оптичного бюджету. XGS-PON, згідно з ITU-T G.9807.1, працює на швидкості 10 Гбіт/с у низхідному та висхідному напрямках поверх інфраструктури “точка - багато точок”, тому якість ODN безпосередньо впливає на можливість такого переходу [6].

IEEE 802.3ca також показує, що розвиток Ethernet PON іде в напрямі підвищення швидкостей до 25 і 50 Гбіт/с. У проєкті стандарту зазначено підтримку симетричних і асиметричних режимів 25/10, 25/25, 50/10, 50/25 і 50/50

Гбіт/с, що підтверджує важливість правильного планування фізичної топології ще на етапі будівництва мережі.

Вибір топології також залежить від типу території. У щільній міській забудові важливо мінімізувати витрати на підключення одного абонента, тому доцільно використовувати PON із централізованим або каскадним розгалуженням. У приватному секторі потрібно більше уваги приділяти довжині абонентських ліній і розміщенню сплітерів. Для бізнес-центрів або промислових об'єктів часто важливішими є керованість, резервування й гарантовані параметри каналу, тому там можуть застосовуватися активні або комбіновані топології.

2.2 Активні та пасивні мережі оптоволоконного доступу

Після розгляду топологій оптоволоконних мереж доступу потрібно детальніше зупинитися на двох основних підходах до їх побудови: активному та пасивному. Обидва варіанти використовують оптичне волокно як середовище передавання, але мають різну логіку роботи. В активних мережах між оператором і абонентом встановлюється активне обладнання, яке потребує живлення. У пасивних мережах розподіл сигналу виконується через пасивні оптичні елементи, переважно сплітери.

Активна оптична мережа, або AON, зазвичай будується за принципом Ethernet-доступу. У такій схемі в мережі використовуються комутатори, маршрутизатори, медіаконвертери або інше активне обладнання. Воно може встановлюватися на вузлі оператора, у телекомунікаційній шафі, у будинку або в офісному центрі. Основна ідея полягає в тому, що трафік кожного абонента або групи абонентів обробляється активним пристроєм.

У найпростішому вигляді AON можна уявити як мережу, де від центрального вузла або проміжного комутатора до абонента прокладається окрема оптична лінія. Такий підхід часто називають “точка - точка”. Він дає змогу виділити окремий порт для кожного користувача, налаштувати індивідуальні

параметри доступу, контролювати швидкість, застосовувати VLAN, правила безпеки та інші механізми керування.

Перевагою активної мережі є висока керованість. Оператор може швидко визначити, на якому порту виникла проблема, відключити або переналаштувати конкретного абонента, змінити швидкість, перевірити статистику трафіку. Це зручно для корпоративних підключень, бізнес-центрів, кампусів, промислових підприємств або інших об'єктів, де важливо мати контроль над кожним каналом.

Також активна мережа може забезпечити кращу ізоляцію абонентів. Якщо кожен користувач підключений до окремого порту комутатора, то легше розділяти трафік, обмежувати доступ між сегментами та застосовувати політики безпеки. Для бізнес-клієнтів це може бути важливішим, ніж мінімальна вартість підключення.

Однак активні оптичні мережі мають і помітні недоліки. Найголовніший із них - потреба в електроживленні проміжного обладнання. Якщо комутатор встановлений у будинку або вуличній шафі, потрібно забезпечити стабільне живлення, захист від перепадів напруги, охолодження, фізичну безпеку і доступ для обслуговування. У разі проблем із живленням може зникнути зв'язок одразу в групі абонентів [4].

Ще один недолік AON - більша кількість активних елементів у мережі. Чим більше активного обладнання встановлено на розподільчій ділянці, тим більше точок потенційної відмови. Це збільшує витрати на експлуатацію, потребує регулярного моніторингу та обслуговування. Тому для масового підключення великої кількості абонентів активна схема не завжди є найвигіднішою.

Пасивна оптична мережа, або PON, працює інакше. У ній між OLT на стороні оператора та ONT/ONU на стороні абонента немає активних пристроїв, які потребують живлення. Розподіл сигналу виконується за допомогою пасивних оптичних сплітерів. Саме ця особливість робить PON дуже популярною для масового FTTH-підключення.

У PON один порт OLT може обслуговувати групу абонентів. Для цього оптичний сигнал від OLT надходить до сплітера, який ділить його на кілька

напрямків. Наприклад, можуть застосовуватися схеми 1:16, 1:32 або 1:64. Конкретний коефіцієнт розгалуження залежить від стандарту, оптичного бюджету, відстані до абонентів і вимог оператора до якості послуг.

ITU-T G.984.1 описує GPON як гігабітну пасивну оптичну мережу доступу із загальними характеристиками, що охоплюють послуги, інтерфейси користувача та сервісні інтерфейси, потрібні операторам зв'язку. Ця рекомендація також показує, що GPON розглядається саме як гнучка оптична мережа доступу для різних сценаріїв підключення.

Головна перевага PON - відсутність активного обладнання на ділянці між оператором і абонентами. Це зменшує витрати на електроживлення, спрощує експлуатацію і підвищує надійність розподільчої мережі. Пасивні елементи, такі як сплітери, не потребують налаштування, охолодження або програмного обслуговування. Через це PON добре підходить для великих житлових районів, приватного сектору та інших сценаріїв масового підключення.

Ще одна перевага PON - економне використання волокон. Якщо в активній схемі до кожного абонента або групи абонентів потрібно виділяти окремий порт і лінію, то в PON один порт OLT може працювати з багатьма ONT. Це дозволяє зменшити кількість портів на центральному обладнанні та скоротити витрати на фідерну кабельну інфраструктуру.

Разом із цим PON має свої обмеження. Оскільки абоненти спільно використовують ресурс одного порту OLT, оператор повинен правильно планувати навантаження. Якщо на один порт підключити занадто багато активних користувачів із високим споживанням трафіку, фактична швидкість у години пікового навантаження може знизитися. Тому важливу роль відіграють коефіцієнт розгалуження, профілі послуг, політика розподілу смуги та статистика використання мережі.

У низхідному напрямку PON працює за принципом широкомовного передавання. OLT надсилає потік даних усім ONT у межах одного дерева PON, але кожен абонентський пристрій приймає тільки свої дані. У висхідному напрямку використовується часовий розподіл доступу: кожен ONT передає інформацію у

визначений часовий інтервал. Це потрібно для того, щоб сигнали від різних абонентів не накладалися один на одного.

У пасивних оптичних мережах дуже важливим є поняття оптичного бюджету. Оптичний бюджет - це різниця між потужністю передавача та мінімальною чутливістю приймача з урахуванням допустимих втрат у лінії. Втрати виникають у кабелі, зварних з'єднаннях, конекторах, муфтах і особливо на сплітерах. Якщо втрати будуть занадто великими, абонентське обладнання може працювати нестабільно або взагалі не підключитися до OLT

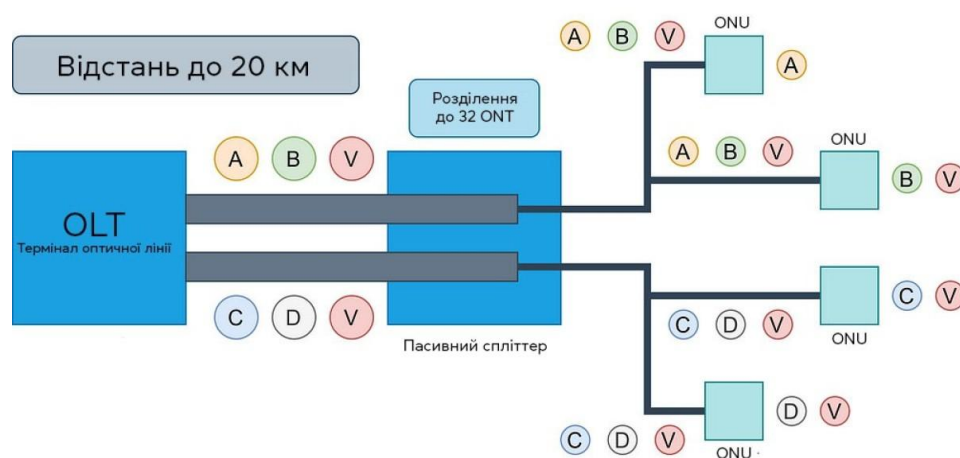


Рисунок 2.2 – Структурна відмінність активної та пасивної оптоволоконної мережі доступу

Порівнюючи AON і PON, можна сказати, що активна мережа краще підходить там, де потрібен індивідуальний контроль над підключеннями. Це можуть бути офіси, підприємства, дата-центри, кампуси або об'єкти з підвищеними вимогами до безпеки й керування. Пасивна мережа краще підходить для масового підключення абонентів, тому що вона дешевша в експлуатації, простіша на розподільчій ділянці та легше масштабується для великої кількості користувачів.

Водночас не можна сказати, що один підхід повністю кращий за інший. На практиці вибір залежить від задачі. Наприклад, для багатоквартирного житлового району PON часто буде логічнішим рішенням, тому що дає змогу підключити багато абонентів через сплітери і зменшити витрати на активне обладнання. Для

бізнес-центру активна Ethernet-мережа може бути зручнішою, бо там важливі окремі порти, VLAN, контроль доступу та гнучке адміністрування.

Важливим фактором є і модернізація. У PON-мережах за правильно побудованої ODN можна переходити на нові покоління технологій без повної заміни пасивної інфраструктури. Наприклад, XGS-PON визначається ITU-T G.9807.1 як 10-гігабітна симетрична пасивна оптична мережа, що працює в оптичній мережі доступу для побутових, корпоративних, мобільних транспортних та інших застосувань. Це означає, що одна й та сама логіка PON може використовуватися для послуг різного рівня складності.

Подальший розвиток Ethernet PON також показує, що пасивні оптичні мережі мають великий запас для підвищення швидкості. IEEE 802.3ca-2020 розширює можливості EPON до багатоканальних систем 25 Гбіт/с і підтримує симетричні та асиметричні режими, зокрема 25/10, 25/25, 50/10, 50/25 і 50/50 Гбіт/с. Це підтверджує, що PON не є застарілим підходом, а навпаки продовжує активно розвиватися [4].

Для активних мереж модернізація зазвичай пов'язана із заміною комутаторів, оптичних модулів або збільшенням кількості портів. Це може бути зручно в локальних мережах, де обладнання зосереджене в одному місці або в межах однієї будівлі. Але якщо активні вузли розміщені по великій території, їх оновлення може вимагати більше часу і витрат.

Ще одним критерієм порівняння є енергоспоживання. У PON основне активне обладнання зосереджене на стороні оператора та абонента. Розподільча ділянка залишається пасивною. В AON активні пристрої можуть бути встановлені в проміжних точках, тому сумарне енергоспоживання мережі зазвичай вище. Для великих операторів це важливо, тому що експлуатаційні витрати накопичуються протягом усього життєвого циклу мережі.

Надійність також оцінюється по-різному. У PON менше активних елементів у полі, тому менше ризиків, пов'язаних із відмовою обладнання або живлення. Але при цьому пошкодження фідерного волокна або порту OLT може вплинути одразу на групу абонентів. В AON відмова одного порту може зачепити лише

одного користувача, але відмова проміжного комутатора може відключити цілу групу підключень. Тому в обох випадках потрібне грамотне проєктування і резервування критичних ділянок [5].

Основні переваги та обмеження AON і PON наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні переваги та обмеження AON і PON

Критерій	AON	PON
Переваги	Висока керованість, окремі порти, зручна діагностика	Нижчий OPEX, менше активного обладнання, економія волокон
Недоліки	Потрібне живлення проміжного обладнання	Ресурс порту ділиться між абонентами
Надійність	Залежить від активних вузлів	Вища на розподільчій ділянці через пасивні елементи
Масштабування	Потребує більше портів і комутаторів	Виконується через сплітери та OLT-порти
Найкраще застосування	Корпоративний сегмент	Масовий FTTH-доступ

Для кращого порівняння активних і пасивних мереж можна виділити кілька основних критеріїв. За вартістю масового підключення PON зазвичай вигідніша, оскільки потребує менше активного обладнання. За керованістю окремого підключення AON має перевагу, бо кожен абонент може бути підключений до окремого порту. За енергоспоживанням PON виглядає кращою через пасивну розподільчу ділянку [6].

У реальних мережах часто використовують змішаний підхід. Наприклад, оператор може будувати основну абонентську мережу на базі PON, а для окремих бізнес-клієнтів використовувати активні Ethernet-підключення. Також у багатоквартирних будинках може бути ситуація, коли оптика доходить до будівлі, а далі всередині використовується активне Ethernet-обладнання. Це показує, що AON і PON не завжди є конкурентами в прямому сенсі. Часто вони доповнюють одне одного.

2.3 Стандарти пасивних мереж оптоволоконного доступу

Пасивні оптичні мережі доступу не розвивалися хаотично. Їхня робота описується міжнародними стандартами, які визначають швидкості передавання, довжини хвиль, принципи взаємодії обладнання, вимоги до фізичного рівня, керування абонентськими пристроями та сумісність між різними поколіннями технологій. Для оператора це важливо, тому що стандарт дає можливість планувати мережу не тільки на момент будівництва, а й з урахуванням майбутньої модернізації.

У сфері пасивних оптичних мереж найбільше значення мають два напрями стандартизації: ITU-T PON та IEEE EPON. Перший напрям пов'язаний із рекомендаціями ITU-T, зокрема GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2 та 50G-PON. Другий напрям належить до стандартів IEEE 802.3 і охоплює EPON, 10G-EPON, 25G-EPON і 50G-EPON. Обидві групи технологій використовують оптичне волокно та пасивне розгалуження, але відрізняються протоколами, підходами до кадрювання, керуванням доступом і взаємодією з Ethernet-мережами [1].

Одним із найпоширеніших стандартів пасивного оптичного доступу є GPON - *Gigabit-capable Passive Optical Network*. Він описується серією рекомендацій ITU-T G.984. GPON став дуже популярним у мережах FTTH, тому що забезпечив достатню швидкість для масового підключення побутових і частково бізнес-абонентів. Рекомендація ITU-T G.984.1 визначає загальні характеристики GPON, а ITU-T G.984.2 описує фізичний рівень таких систем. У G.984.2 вказані номінальні швидкості до 2488,320 Мбіт/с у низхідному напрямку та до 2488,320 Мбіт/с у висхідному напрямку залежно від конфігурації системи.

GPON став важливим етапом розвитку доступу, тому що дозволив перейти від мегабітних підключень до гігабітного рівня. Для більшості домашніх користувачів його можливостей було достатньо для інтернету, IPTV, IP-телефонії, відеосервісів і базових хмарних застосунків. Також GPON зручний для операторів через відносно невисоку вартість обладнання, поширеність рішень на ринку та можливість обслуговувати багато абонентів через один порт OLT.

Наступним етапом розвитку став XG-PON. Ця технологія описується серією рекомендацій ITU-T G.987 і належить до 10-гігабітних пасивних оптичних мереж. У назві XG-PON літера X фактично вказує на перехід до 10G-рівня. Рекомендація ITU-T G.987 визначає терміни й загальні поняття для XG-PON, а G.987.2 описує вимоги до фізичного рівня PMD.

XG-PON забезпечує вищу швидкість у низхідному напрямку порівняно з GPON, тому може краще обслуговувати сегменти з великою кількістю активних абонентів або користувачів із підвищеним споживанням трафіку. Однак класичний XG-PON є асиметричним рішенням: швидкість до абонента значно вища, ніж швидкість від абонента. Для певного етапу розвитку ринку це було прийнятно, оскільки більшість побутових сервісів споживали більше трафіку в низхідному напрямку. Але з розвитком хмарних сховищ, відеоконференцій, віддаленої роботи та корпоративних сервісів потреба у високій висхідній швидкості стала більш помітною [9].

Саме тому важливим стандартом став XGS-PON. Він описується рекомендацією ITU-T G.9807.1. Головна особливість XGS-PON полягає в симетричній швидкості 10 Гбіт/с у низхідному та висхідному напрямках. У рекомендації зазначено, що XGS-PON призначений для оптичних мереж доступу в житлових, бізнесових, мобільних транспортних та інших застосуваннях і працює за принципом “точка - багато точок”.

Окремим поколінням є NG-PON2 - *Next-Generation Passive Optical Network*.
2. Ця технологія пов'язана з рекомендаціями ITU-T G.989 і використовує складніший підхід до передавання, ніж GPON або XGS-PON. Основна ідея NG-PON2 полягає у використанні TWDM, тобто поєднання часового і хвильового мультиплексування. Завдяки цьому в одній оптичній розподільчій мережі можуть працювати кілька довжин хвиль, що збільшує загальну пропускну здатність системи.

NG-PON2 є технічно потужним рішенням, але на практиці воно складніше й дорожче. Для його роботи потрібні більш складні оптичні модулі, зокрема з можливістю налаштування довжини хвилі. Через це NG-PON2 не став таким

масовим, як GPON або XGS-PON, але він залишається важливим етапом розвитку PON і може застосовуватися в мережах із високими вимогами до пропускної здатності, резервування та гнучкого розподілу ресурсів.

Ще одним важливим напрямом є 50G-PON, який розвивається в межах ITU-T як наступний етап після 10-гігабітних систем. Його поява пов'язана з тим, що оператори поступово готуються до ще більшого зростання навантаження в мережах доступу. Такі рішення можуть бути потрібні для густонаселених районів, бізнес-сегмента, мобільного fronthaul/backhaul, промислових мереж і сервісів, які потребують дуже високої пропускної здатності [16].

Паралельно з напрямом ITU-T розвивається сімейство EPON, яке стандартизується IEEE. EPON базується на Ethernet-підході, тому його часто розглядають як більш природне продовження Ethernet-мереж у доступі. Перші EPON-рішення забезпечували гігабітний рівень швидкості й отримали поширення в окремих регіонах, особливо там, де оператори активно будували Ethernet-орієнтовані мережі.

Подальшим розвитком став 10G-EPON, який підвищив швидкість передавання до 10-гігабітного рівня. Його перевага полягає в збереженні Ethernet-логіки та можливості інтеграції з IP/Ethernet-мережами оператора. Для операторів, які вже мають велику Ethernet-інфраструктуру, це може бути зручним з погляду керування та сумісності з наявними рішеннями.

Найновішим розвитком цього напрямку є 25G-EPON і 50G-EPON, пов'язані зі стандартом IEEE 802.3ca-2020. Цей стандарт розширює роботу Ethernet PON до багатоканальних систем по 25 Гбіт/с і підтримує симетричні та асиметричні режими, зокрема 25/10, 25/25, 50/10, 50/25 і 50/50 Гбіт/с у напрямках downstream/upstream.

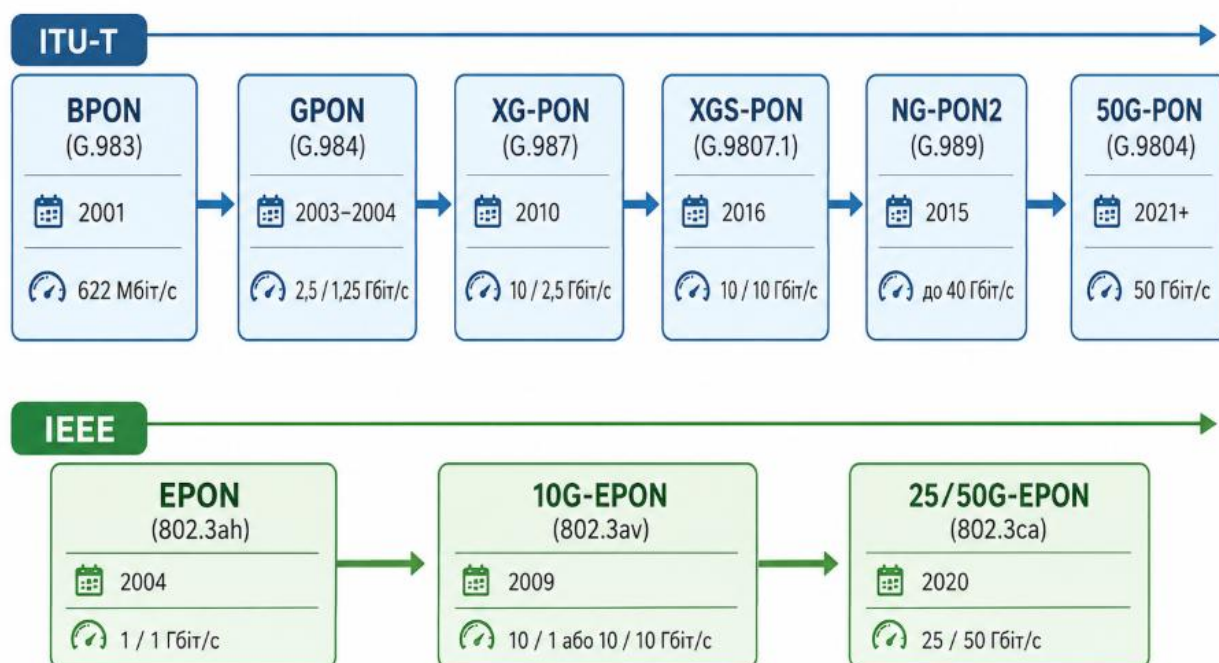


Рисунок 2.3 – Еволюція стандартів пасивних оптичних мереж доступу

IEEE 802.3ca є важливим тому, що він показує подальший рух Ethernet PON у бік високошвидкісного доступу. Такі стандарти можуть бути корисними не тільки для звичайного домашнього інтернету, а й для підключення підприємств, базових станцій мобільних мереж, Wi-Fi-точок високої щільності, систем відеоспостереження та інших сервісів, де потрібна велика смуга пропускання.

Якщо порівнювати стандарти ITU-T і IEEE, то можна сказати, що вони вирішують схожу задачу, але мають різну історію розвитку. Стандарти ITU-T більше орієнтовані на телекомунікаційний підхід, де важливі сервісні профілі, керування абонентським обладнанням, сумісність із операторськими мережами та підтримка різних послуг. IEEE EPON більше пов'язаний з Ethernet-екосистемою, де основний акцент робиться на передачі Ethernet-кадрів і сумісності з Ethernet-мережами.

Для оператора вибір між цими сімействами залежить від багатьох чинників. Якщо мережа вже побудована на GPON, логічним шляхом модернізації може бути XGS-PON або 50G-PON. Якщо оператор історично використовує EPON, то природним продовженням може бути 10G-EPON або 25/50G-EPON. Також важливими є вартість обладнання, доступність ONT/ONU, підтримка з боку

виробників, вимоги до швидкості та можливість співіснування з уже встановленою інфраструктурою.

Питання співіснування різних поколінь PON є дуже важливим. Оператор не може просто вимкнути стару мережу й одразу перевести всіх абонентів на новий стандарт, тому що це потребувало б великих витрат і масової заміни обладнання. Через це нові покоління PON часто проєктуються так, щоб мати можливість працювати поруч зі старими поколіннями в одній оптичній розподільчій мережі, використовуючи різні довжини хвиль. Саме така можливість робить модернізацію поступовою і більш економічно прийнятною.

Важливо також розуміти, що стандарт не гарантує однакову якість у всіх мережах. Наприклад, дві мережі GPON можуть мати різну якість роботи залежно від коефіцієнта розгалуження, довжини ліній, якості зварювання, втрат у конекторах, налаштувань OLT і завантаженості сегмента. Тобто стандарт задає технічні рамки, але реальний результат залежить від проєктування, монтажу та експлуатації.

Для майбутнього розвитку оптоволоконних мереж доступу особливо важливими є стандарти, які підтримують симетричні швидкості та більшу пропускну здатність. Це пов'язано з тим, що сучасний користувач уже не тільки споживає контент, а й активно передає дані. Для IoT-систем, відеоспостереження, хмарних сервісів, дистанційної роботи й мобільних мереж наступних поколінь висхідний канал стає майже таким самим важливим, як і низхідний.

Стандарти пасивних оптичних мереж доступу визначають технічну основу для побудови сучасних FTTH- і FTTB-мереж. GPON залишається масовим і економічно привабливим рішенням, XGS-PON є актуальним варіантом для переходу до симетричних 10-гігабітних послуг, NG-PON2 демонструє можливості хвильового мультиплексування, а 25/50G-EPON і 50G-PON показують напрям подальшого розвитку високошвидкісного доступу. У наступних підрозділах доцільно розглянути технічні принципи побудови конкретних технологій детальніше.

2.4 Технічні принципи побудови мереж доступу GPON, XG-PON за стандартами ITU-T

Технології GPON і XG-PON належать до сімейства пасивних оптичних мереж, які стандартизовані ITU-T. Вони будуються за спільною ідеєю: один оптичний порт на стороні оператора через пасивну розподільчу мережу обслуговує групу абонентів. Основна різниця між ними полягає у швидкості передавання, вимогах до фізичного рівня, довжинах хвиль і можливостях подальшого масштабування.

GPON є однією з найпоширеніших технологій FTTH-доступу. Її назва розшифровується як Gigabit-capable Passive Optical Network, тобто гігабітна пасивна оптична мережа. Стандарт GPON описується серією рекомендацій ITU-T G.984. Він став популярним через те, що дав змогу операторам масово будувати оптичні мережі доступу з достатньою швидкістю для домашніх абонентів, малого бізнесу, IPTV, IP-телефонії та інших цифрових послуг.

Типова GPON-мережа складається з трьох основних частин: OLT, ODN і ONT/ONU. OLT встановлюється на вузлі оператора та виконує функції керування мережею, передавання трафіку до абонентів, приймання даних від них і взаємодії з транспортною IP/MPLS або Ethernet-мережею оператора. ODN є пасивною оптичною розподільчою мережею, яка містить кабелі, сплітери, муфти, кроси, конектори та зварні з'єднання. ONT або ONU встановлюється на стороні абонента та перетворює оптичний сигнал у електричні інтерфейси для підключення користувацького обладнання.

GPON працює за топологією “точка - багато точок”. Це означає, що від одного порту OLT сигнал передається через оптичний сплітер до багатьох абонентських пристроїв. Найчастіше в реальних мережах використовують коефіцієнти розгалуження 1:32 або 1:64, хоча точне значення залежить від оптичного бюджету, довжини ліній, якості пасивних елементів і політики оператора. Чим більший коефіцієнт розгалуження, тим більше абонентів може обслуговувати один порт OLT, але тим більші втрати сигналу в сплітері.

У GPON використовується розділення низхідного і висхідного напрямків за довжинами хвиль. У низхідному напрямку, тобто від OLT до абонентів, зазвичай використовується область близько 1490 нм. У висхідному напрямку, тобто від абонентів до OLT, використовується область близько 1310 нм. Для передавання відеосигналу в деяких мережах може додатково використовуватися довжина хвилі близько 1550 нм. Такий поділ дозволяє передавати дані в обох напрямках по одному оптичному волокну [2].

Принцип передавання в низхідному напрямку є ширококовним. OLT формує загальний потік даних і передає його всім ONT у межах одного PON-дерева. Кожен абонентський пристрій отримує цей потік, але обробляє тільки ті кадри, які призначені саме йому. Для захисту інформації застосовуються механізми шифрування, оскільки фізично сигнал доходить до всіх пристроїв у групі.

У висхідному напрямку ситуація складніша, тому що багато ONT передають дані до одного OLT через спільне оптичне середовище. Щоб сигнали не накладалися один на одного, використовується часовий поділ доступу. OLT призначає кожному ONT окремі часові інтервали для передавання. Такий механізм називається TDMA. Завдяки цьому абонентські пристрої можуть працювати в одній мережі без колізій [3].

Важливою частиною GPON є механізм динамічного розподілу смуги пропускання, або DBA. Його задача полягає в тому, щоб гнучко розподіляти ресурси висхідного каналу між абонентами залежно від поточного навантаження. Наприклад, якщо один користувач майже не передає дані, його невикористана частина ресурсу може бути тимчасово надана іншому користувачу, який активно завантажує файли або передає відео. Це дозволяє ефективніше використовувати спільну пропускну здатність.

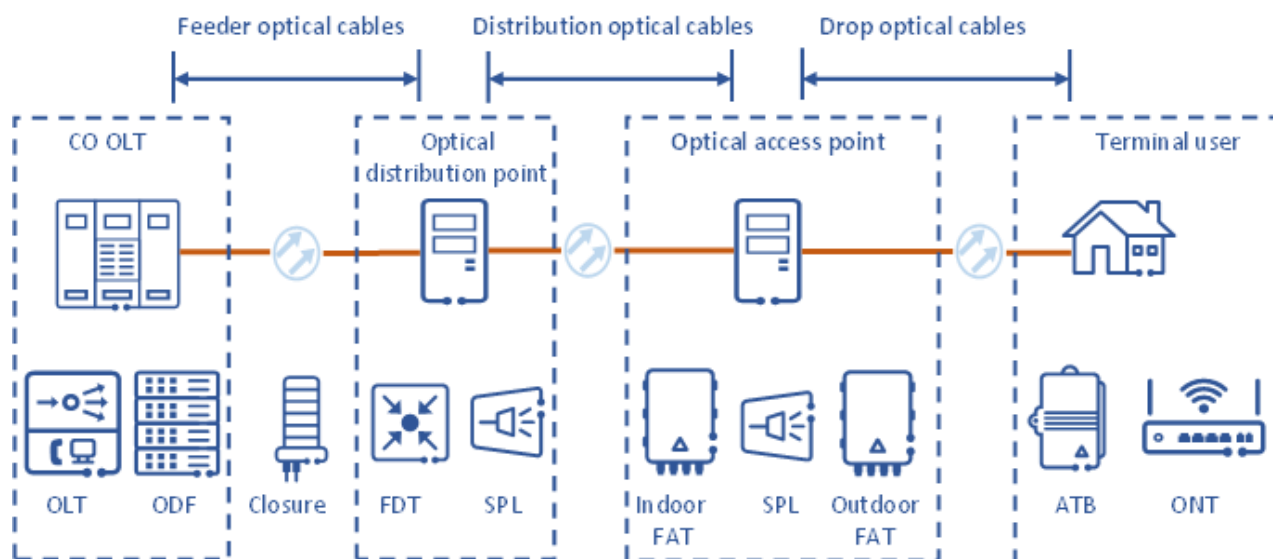


Рисунок 2.4 – Загальна структура мережі доступу GPON

У GPON застосовується метод інкапсуляції GEM, тобто GPON Encapsulation Method. Він дозволяє передавати різні типи трафіку, зокрема Ethernet-кадри, TDM-потоки та інші сервіси. Завдяки цьому GPON є досить гнучкою технологією і може підтримувати не тільки звичайний доступ до інтернету, а й IPTV, VoIP, корпоративні послуги та інші сервіси оператора.

Під час побудови GPON-мережі важливо правильно розрахувати оптичний бюджет. У нього входять втрати в оптичному кабелі, зварних з'єднаннях, конекторах, муфтах і сплітерах. Найбільше загасання створює саме сплітер. Наприклад, сплітер 1:32 має значно більші втрати, ніж сплітер 1:8. Тому при проектуванні потрібно враховувати не тільки відстань до абонентів, а й загальну кількість розгалужень [7].

На практиці GPON добре підходить для масового підключення абонентів у житлових районах. Його перевагами є відносно низька вартість обладнання, велика кількість сумісних пристроїв на ринку, достатня швидкість для більшості базових послуг і можливість використання пасивної розподільчої мережі без живлення на проміжних ділянках. Саме тому GPON досі залишається поширеним стандартом у багатьох операторів.

Але GPON має і свої обмеження. Основне з них - обмежена пропускна здатність порту OLT, яка розподіляється між групою абонентів. Якщо в одному

PON-сегменті багато користувачів активно споживають трафік, у години пікового навантаження може виникати зниження фактичної швидкості. Також GPON не завжди підходить для сучасних задач, де потрібна висока симетрична швидкість, наприклад для бізнес-клієнтів, відеоспостереження, мобільного backhaul або великих хмарних сервісів.

Для вирішення цих обмежень було розроблено XG-PON. Назва XG-PON означає 10-гігабітну пасивну оптичну мережу. Вона описується серією рекомендацій ITU-T G.987. Якщо GPON можна вважати гігабітним поколінням PON, то XG-PON є наступним кроком, який збільшує пропускну здатність у низхідному напрямку до 10-гігабітного рівня.

XG-PON зберігає загальну ідею пасивної оптичної мережі: OLT, ODN, сплітери та ONT/ONU. Тобто фізична логіка побудови залишається схожою на GPON. Але змінюються параметри передавання, довжини хвиль і вимоги до обладнання. Основною метою XG-PON було підвищення швидкості без повної відмови від уже побудованої оптичної розподільчої інфраструктури.

Типовий варіант XG-PON1 підтримує швидкість близько 10 Гбіт/с у низхідному напрямку та 2,5 Гбіт/с у висхідному напрямку. Тобто технологія залишається асиметричною, але значно перевищує можливості GPON за швидкістю передавання до абонентів. Це робить її корисною для районів із високим навантаженням, багатоквартирної забудови, корпоративних сервісів і сценаріїв, де потрібно збільшити пропускну здатність без повного переходу на нову архітектуру.

Для співіснування з GPON у тій самій ODN XG-PON використовує інші довжини хвиль. Це важливо, тому що оператор може поступово модернізувати мережу, не переводячи всіх абонентів одночасно.

З погляду оператора XG-PON є етапом модернізації мережі. Якщо GPON уже розгорнуто, перехід до XG-PON може бути економічно доцільним у тих районах, де виникає нестача пропускну здатності. При цьому не завжди потрібно одразу замінювати всі абонентські пристрої. Можна виконувати модернізацію

поступово, починаючи з найбільш навантажених сегментів або з абонентів, які замовляють дорожчі тарифні плани.

Однак XG-PON не вирішує повністю проблему симетричності каналу. Його висхідна швидкість вища, ніж у GPON, але все одно менша за низхідну. Через це пізніше з'явився XGS-PON, де швидкість 10 Гбіт/с забезпечується в обох напрямках. Але для розуміння еволюції ITU-T PON важливо розглядати XG-PON як проміжний етап між GPON і симетричними 10-гігабітними рішеннями.

Порівнюючи GPON і XG-PON, можна виділити кілька ключових відмінностей. GPON є дешевшим і масовішим, має велику базу обладнання та добре підходить для стандартного домашнього доступу. XG-PON забезпечує більшу швидкість у низхідному напрямку, краще підходить для високонавантажених сегментів і може використовуватися для модернізації мережі без повної заміни ODN. Але обладнання XG-PON дорожче, а його доцільність залежить від реального попиту на вищу швидкість.

Важливим питанням при побудові GPON і XG-PON є вибір коефіцієнта розгалуження. Теоретично оператор може прагнути підключити більше абонентів до одного порту, щоб зменшити витрати. Але на практиці надмірне розгалуження може призвести до двох проблем: збільшення оптичних втрат і поділу пропускної здатності між надто великою кількістю користувачів. Тому коефіцієнт розгалуження потрібно підбирати не формально, а з урахуванням типу абонентів і прогнозованого навантаження.

Для домашніх користувачів GPON часто є достатнім, якщо мережа правильно спланована. Для бізнес-клієнтів, багатоквартирних комплексів із високою щільністю користувачів або районів із великим споживанням відео й хмарних сервісів XG-PON може бути кращим варіантом. Проте сьогодні при новому будівництві оператори все частіше розглядають уже XGS-PON, оскільки він дає симетричні 10 Гбіт/с і краще відповідає сучасним вимогам.

У таких мережах також важлива підтримка QoS. Оскільки різні типи трафіку мають різні вимоги, оператор повинен пріоритезувати голос, відео, службовий трафік або корпоративні сервіси. Наприклад, затримка для IP-

телефонії або відеоконференцій є критичнішою, ніж для звичайного завантаження файлів. Тому GPON і XG-PON мають механізми, які дозволяють розділяти сервіси за класами обслуговування.

З точки зору фізичного проєктування, і GPON, і XG-PON вимагають якісного монтажу ODN. Погане зварювання, забруднені конектори, надмірна кількість з'єднань або неправильно підібраний сплітер можуть знизити якість сигналу навіть тоді, коли стандарт підтримує потрібну швидкість. Тому реальні характеристики мережі залежать не лише від OLT і ONT, а й від усього пасивного тракту.

2.5 Технічні принципи побудови GE-PON, 10GE-PON за стандартами IEEE

Окрім технологій GPON і XG-PON, які стандартизуються ITU-T, у пасивних оптичних мережах доступу існує ще один важливий напрям - Ethernet PON, або EPON. Його розвиток пов'язаний зі стандартами IEEE 802.3. Головна особливість цього підходу полягає в тому, що мережа доступу будується на основі Ethernet-логіки. Це робить EPON зручним для операторів, які вже використовують Ethernet у своїх транспортних і агрегаційних мережах.

Технологія GE-PON, або Gigabit Ethernet Passive Optical Network, часто також називається просто EPON. Вона була стандартизована в IEEE 802.3ah. Цей стандарт стосується Ethernet in the First Mile і включає рішення для Ethernet-доступу, зокрема пасивні оптичні мережі. На відміну від GPON, де використовується власний механізм інкапсуляції GEM, EPON передає Ethernet-кадри більш безпосередньо. Через це його структура виглядає простішою для інтеграції з Ethernet-мережами [14].

Основна відмінність GE-PON полягає в роботі з кадрами Ethernet. Оскільки Ethernet є дуже поширеною технологією в локальних і операторських мережах, EPON добре вписується в наявну IP/Ethernet-інфраструктуру. Для оператора це означає простішу взаємодію з комутаторами, маршрутизаторами, VLAN,

механізмами QoS і системами керування мережею. Через це EPON отримав поширення в тих регіонах і мережах, де Ethernet-доступ був основним напрямом розвитку.

У низхідному напрямку GE-PON працює за широкомовним принципом. OLT передає Ethernet-кадри всім ONU в межах одного PON-сегмента. Кожен ONU приймає загальний потік, але обробляє тільки кадри, які призначені для нього. У висхідному напрямку кілька ONU повинні передавати дані до одного OLT через спільне середовище. Щоб уникнути накладання сигналів, використовується механізм керування доступом до середовища.

Для цього в EPON застосовується MPCP - *Multi-Point Control Protocol*. Його задача полягає в координації передавання даних від різних ONU. OLT надає кожному ONU дозвіл на передавання в певний часовий інтервал. Завдяки цьому ONU не передають одночасно й не створюють колізій у висхідному напрямку. Фактично MPCP виконує для EPON подібну роль, яку механізми TDMA і DBA виконують у GPON-системах.

GE-PON підтримує гігабітний рівень передавання. У класичному варіанті швидкість становить 1 Гбіт/с у низхідному та 1 Гбіт/с у висхідному напрямках на фізичному рівні. Це зробило технологію зручною для раннього масового FTTH-доступу, коли потреби більшості користувачів не перевищували гігабітний рівень. Для інтернету, IPTV, VoIP і стандартних побутових сервісів цього було достатньо.

Наступним етапом розвитку стала технологія 10GE-PON, або 10G-EPON. Вона була стандартизована в IEEE 802.3av. Цей стандарт розширив роботу EPON до 10 Гбіт/с і передбачив як симетричний режим 10 Гбіт/с у двох напрямках, так і асиметричний режим із 10 Гбіт/с [15]

10GE-PON зберігає основну Ethernet-логіку попереднього покоління. Це важливо, тому що оператори могли модернізувати мережу, не змінюючи всю концепцію керування трафіком. У стандарті було передбачено збереження багатьох принципів EPON, але з оновленням фізичного рівня для підтримки вищої швидкості. Завдяки цьому 10GE-PON став природним розвитком GE-PON.

Для 10GE-PON важливим є питання співіснування з уже розгорнутими EPON-мережами. Оператор не може миттєво замінити всі ONU й OLT у мережі, тому модернізація повинна виконуватися поступово. У 10G-EPON передбачена можливість підтримки як старих 1G ONU, так і нових 10G ONU в межах однієї інфраструктури за умови відповідного обладнання. Це дозволяє переводити абонентів на нові швидкості поетапно.

Технічно 10GE-PON використовує інші параметри фізичного рівня порівняно з GE-PON. Для вищої швидкості потрібні якісніші оптичні передавачі та приймачі, точніша синхронізація, а також кращий контроль втрат у пасивній мережі. Як і в інших PON-технологіях, дуже важливим залишається оптичний бюджет. Якщо в ODN занадто багато втрат через довгі кабельні ділянки, сплітери або неякісні з'єднання, стабільна робота на 10 Гбіт/с може бути ускладнена [16].

У низхідному напрямку 10GE-PON, як і GE-PON, передає потік від OLT до всіх ONU в межах одного PON-дерева. У висхідному напрямку використовується керований доступ, щоб абонентські пристрої не передавали одночасно. При цьому швидкість висхідного каналу може бути різною залежно від режиму. В асиметричному варіанті ONU передає на швидкості 1 Гбіт/с, а в симетричному - 10 Гбіт/с. Симетричний варіант є більш перспективним для бізнес-послуг, хмарних сервісів, відеоспостереження та корпоративних підключень.

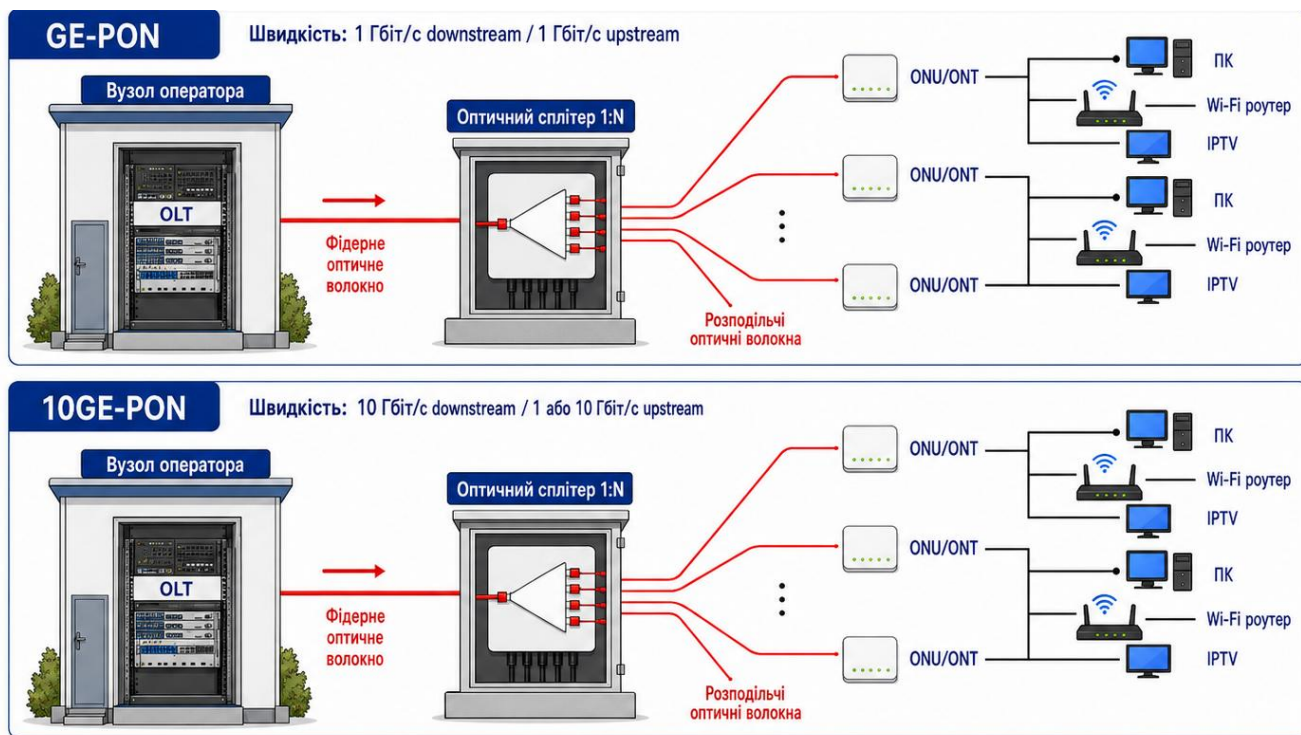


Рисунок 2.5 – Загальна структура мереж GE-PON та 10GE-PON

Однією з переваг 10GE-PON є те, що технологія добре поєднується з Ethernet-сервісами. Оператор може використовувати звичні підходи до побудови VLAN, пріоритезації трафіку, агрегації та контролю доступу. Це спрощує інтеграцію мережі доступу з вищими рівнями операторської інфраструктури. У таких мережах простіше реалізовувати послуги для різних типів клієнтів: домашніх користувачів, малого бізнесу, корпоративних замовників або службових підключень.

Порівняно з GE-PON, 10GE-PON дає значно більший запас пропускної здатності. Це важливо для сегментів, де багато абонентів одночасно користуються високошвидкісними сервісами. Наприклад, у багатоквартирному будинку або житловому комплексі збільшення швидкості PON-сегмента дає оператору змогу пропонувати швидші тарифні плани та зменшити ризик перевантаження порту OLT у години пікового навантаження.

Але 10GE-PON має і вищі вимоги до обладнання. Оптичні модулі, OLT-плати та ONU для 10-гігабітного доступу дорожчі порівняно з гігабітними рішеннями. Тому оператор повинен оцінювати, чи справді є потреба в такій

модернізації. Якщо абоненти використовують лише базові тарифи, перехід на 10GE-PON може бути економічно невиправданим. Але якщо мережа обслуговує бізнес-клієнтів або райони з високим трафіком, така модернізація може бути логічною.

З погляду побудови мережі GE-PON і 10GE-PON мають однакову базову структуру. В обох випадках є OLT, пасивна ODN та ONU. Основна різниця полягає у швидкості, фізичному рівні та режимах роботи. Це дозволяє розглядати 10GE-PON не як повністю нову архітектуру, а як розвиток Ethernet PON із підвищеною пропускну здатністю [17].

Важливим напрямом розвитку після 10GE-PON стали 25G-EPON і 50G-EPON. Вони описуються IEEE 802.3ca-2020, який розширив роботу EPON до багатоканальних систем по 25 Гбіт/с і передбачив симетричні та асиметричні режими 25/10, 25/25, 50/10, 50/25 і 50/50 Гбіт/с. Це показує, що Ethernet PON продовжує розвиватися як технологія високошвидкісного доступу.

Для теми цієї роботи GE-PON і 10GE-PON важливі тому, що вони демонструють інший підхід до пасивного оптичного доступу порівняно з GPON/XG-PON. Якщо GPON більше пов'язаний із телекомунікаційною моделлю ITU-T, то EPON ближчий до Ethernet-мереж. Це не означає, що один підхід однозначно кращий за інший. Вибір залежить від історії мережі оператора, наявного обладнання, регіону, вартості рішень і вимог до сервісів.

Якщо порівнювати GE-PON із GPON, то GE-PON простіше інтегрується з Ethernet-інфраструктурою, але GPON часто має кращу ефективність використання смуги для мультисервісних операторських задач. Якщо порівнювати 10GE-PON із XG-PON або XGS-PON, то всі ці технології вже працюють на 10-гігабітному рівні, але відрізняються протоколами, режимами швидкості, підходами до керування та екосистемою обладнання [20].

На практиці оператор рідко обирає стандарт повністю “з нуля”. Частіше він продовжує той напрям, який уже використовується в його мережі. Якщо в оператора побудована EPON-інфраструктура, модернізація до 10GE-PON або 25/50G-EPON може бути логічнішою, ніж перехід на ITU-T PON. Якщо ж мережа

побудована на GPON, тоді природнішим шляхом буде XGS-PON або 50G-PON. Саме тому питання сумісності й еволюції стандартів є одним із ключових при плануванні розвитку мережі доступу [21].

Варто також враховувати, що швидкість стандарту - це не єдиний критерій. Наприклад, 10GE-PON може мати високу пропускну здатність, але фактична якість послуги залежатиме від завантаженості сегмента, коефіцієнта розгалуження, якості ODN, налаштувань QoS і тарифної політики оператора. Тому технічні характеристики стандарту треба розглядати разом із реальною архітектурою мережі.

2.6 Оптичні компоненти: OLT, ONT/ONU, оптоволокно, сплітери, активні комутатори

Для побудови оптоволоконної мережі доступу недостатньо лише вибрати стандарт, наприклад GPON, XGS-PON або 10GE-PON. Потрібно також правильно підібрати основні компоненти мережі, тому що саме вони визначають реальну якість роботи системи. Навіть якщо стандарт підтримує високу швидкість, погано спроектована або неякісно змонтована фізична інфраструктура може обмежити швидкість, стабільність і можливість подальшої модернізації.

Основними компонентами оптоволоконної мережі доступу є OLT, ONT/ONU, оптичне волокно, пасивна оптична розподільча мережа ODN, оптичні сплітери, муфти, кроси, конектори, оптичні модулі та, у випадку активних мереж, Ethernet-комутатори. Усі ці елементи працюють як єдина система. Якщо один із них має неправильні параметри або встановлений з помилками, це може вплинути на всю лінію зв'язку.

Центральним активним елементом PON-мережі є OLT - *Optical Line Terminal*. Це обладнання встановлюється на стороні оператора, зазвичай у центральному вузлі, районному вузлі або технічному приміщенні. OLT підключає оптичну мережу доступу до транспортної мережі оператора і керує роботою абонентських пристроїв. У рекомендації ITU-T G.984.1 GPON-система описується

як така, що в загальному випадку складається з OLT, ONU або ONT і пасивної ODN між ними.

OLT виконує кілька важливих функцій. По-перше, він формує низхідний потік даних до абонентів. По-друге, приймає висхідний трафік від ONT/ONU. По-третє, розподіляє ресурси між абонентами, контролює часові інтервали передавання у висхідному напрямку, підтримує профілі швидкості, VLAN, пріоритезацію трафіку та механізми якості обслуговування. У мережах GPON OLT також взаємодіє з абонентськими пристроями через службові механізми керування, зокрема для реєстрації ONT, налаштування сервісів і контролю параметрів лінії.

У практичній мережі OLT може мати кілька плат і багато PON-портів. Кожен порт обслуговує окреме PON-дерево, яке через сплітери підключає групу абонентів. Наприклад, один порт може працювати з 32 або 64 ONT, якщо це дозволяють оптичний бюджет і політика оператора. Тому продуктивність OLT впливає не лише на одного абонента, а на цілий сегмент мережі.

Важливою характеристикою OLT є підтримка конкретного стандарту. OLT для GPON не є автоматично сумісним із XGS-PON або 10GE-PON, якщо в ньому немає відповідних плат або оптичних модулів. У сучасних операторських мережах можуть використовуватися комбіновані рішення, де одна платформа OLT підтримує кілька поколінь PON через різні лінійні карти. Це зручно для поступової модернізації мережі.

На стороні абонента встановлюється ONT або ONU. Ці терміни часто використовуються близько за змістом, але між ними є певна різниця. ONU - *Optical Network Unit* - загальна назва абонентського або розподільного оптичного пристрою. ONT - *Optical Network Terminal* - зазвичай означає кінцевий пристрій, який встановлюється безпосередньо у користувача, наприклад у квартирі, приватному будинку або офісі. У побутових FTTH-мережах найчастіше говорять саме про ONT [17].

ONT приймає оптичний сигнал від OLT і перетворює його в електричні інтерфейси, зручні для користувача. Це можуть бути Ethernet-порти, Wi-Fi,

телефонні порти FXS, порти для IPTV або інші інтерфейси залежно від моделі пристрою. У простішому варіанті ONT лише передає інтернет на маршрутизатор абонента. У складніших моделях ONT може поєднувати функції оптичного термінала, маршрутизатора, Wi-Fi-точки доступу та VoIP-шлюзу.

ONT також виконує службові функції. Він реєструється на OLT, отримує конфігурацію, підтримує шифрування, виконує передавання у визначені часові інтервали та передає оператору інформацію про стан оптичної лінії. Для оператора це важливо, тому що через систему керування можна бачити рівень оптичного сигналу, статус пристрою, помилки, час роботи та інші параметри. Це спрощує діагностику несправностей [20].

Оптичне волокно має кілька важливих параметрів: загасання, дисперсію, допустимий радіус вигину, механічну міцність і стійкість до зовнішніх умов. Для мереж доступу особливо важливий радіус вигину, тому що кабель часто прокладається в будинках, під'їздах, квартирах, кабельних каналах і розподільчих коробках. Якщо волокно сильно зігнути, зростають втрати сигналу, і це може призвести до нестабільної роботи ONT.

У PON-мережах між OLT і ONT розташована ODN - *Optical Distribution Network*. Вона є пасивною частиною мережі й включає всі елементи, через які проходить оптичний сигнал: кабелі, сплітери, муфти, кроси, патч-корди, конектори та зварні з'єднання. FTTH Council Europe описує FTTH Handbook як ресурс, який охоплює всі частини FTTH-мережі - від центрального офісу до абонентського обладнання, включаючи пасивне та активне обладнання, планування, проєктування, будівництво й експлуатацію.

ODN є критично важливою частиною мережі, тому що саме вона визначає, чи зможе оператор у майбутньому перейти на швидші стандарти. Якщо під час будівництва було використано якісне волокно, правильно виконані зварювання, обрані нормальні сплітери й залишений запас оптичного бюджету, тоді модернізація з GPON на XGS-PON або 50G-PON буде простішою. Якщо ж ODN має великі втрати, багато зайвих з'єднань або погано задокументована, модернізація може стати складною і дорогою.

Одним із головних пасивних елементів PON є оптичний сплітер. Його задача - розділити один оптичний сигнал на кілька напрямків або, у зворотному напрямку, об'єднати сигнали від кількох абонентів до одного порту OLT. Сплітери не потребують електроживлення, тому вони добре підходять для встановлення в муфтах, шафах, підвалах або розподільчих боксах [21].

Найчастіше використовуються сплітери 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 і 1:64. Чим більший коефіцієнт розгалуження, тим більше абонентів можна підключити до одного порту OLT. Але разом із цим збільшується загасання сигналу. Наприклад, сплітер 1:32 має значно більші втрати, ніж 1:8, тому його не можна застосовувати без розрахунку оптичного бюджету.

Сплітери можуть встановлюватися за різними схемами. При централізованому розгалуженні один великий сплітер розташовується в одному вузлі, наприклад у телекомунікаційній шафі або підвалі будинку. При каскадному розгалуженні використовується кілька рівнів сплітерів, наприклад 1:4 на першому рівні та 1:8 на другому. Обидва варіанти можуть давати однаковий загальний коефіцієнт розгалуження, але відрізняються зручністю монтажу, обслуговування та розподілу волокон.

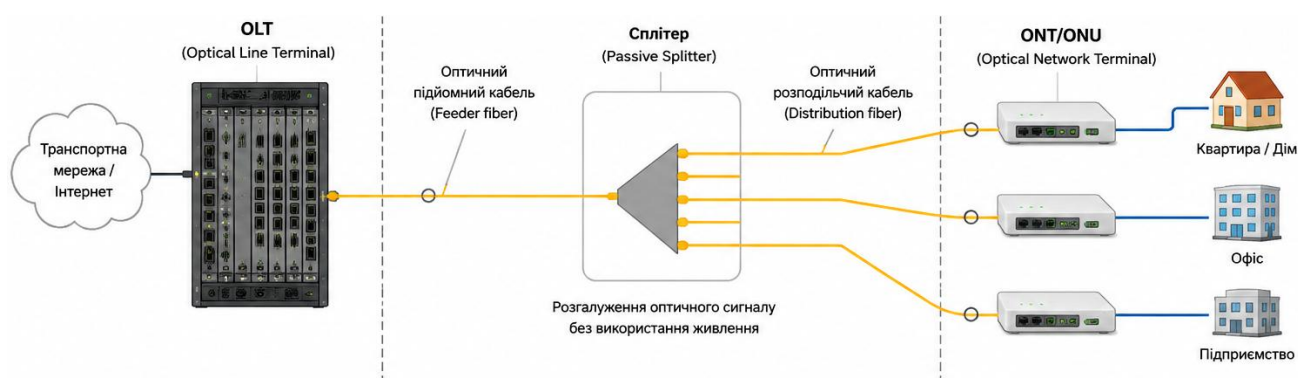


Рисунок 2.6 – Основні компоненти пасивної оптичної мережі доступу

У мережах доступу також важливі оптичні муфти. Вони використовуються для з'єднання, захисту та розгалуження оптичних кабелів. У муфті можуть розміщуватися зварні з'єднання, касети для волокон, іноді й сплітери. Муфта повинна захищати волокно від вологи, пилу, механічних пошкоджень і

температурних впливів. У польових умовах якість муфт має велике значення, оскільки вони часто встановлюються в колодязях, на опорах або в інших складних умовах.

Оптичні кроси та розподільчі панелі використовуються для організації підключень у вузлах оператора, будинках або технічних приміщеннях. Вони дозволяють зручно комутувати волокна, підключати патч-корди, виконувати вимірювання та змінювати схему підключення без зварювання. Добре організований крос спрощує експлуатацію мережі, тому що техніку легше знайти потрібне волокно і виконати діагностику.

Конектори та патч-корди здаються дрібними елементами, але вони також впливають на якість мережі. Забруднений або пошкоджений конектор може внести значні втрати сигналу. У PON-мережах це особливо критично, тому що запас оптичного бюджету обмежений. Через це під час монтажу й обслуговування потрібно очищати конектори, перевіряти якість з'єднання та уникати зайвих роз'ємних стиків.

Для активних оптоволоконних мереж важливими компонентами є активні комутатори. Вони використовуються в архітектурах AON, FTTB або корпоративних FTTO-рішеннях. Комутатор приймає трафік через оптичний або електричний uplink і розподіляє його між абонентськими портами. На відміну від пасивного сплітера, комутатор аналізує кадри, працює з MAC-адресами, VLAN, QoS і може виконувати додаткові функції безпеки.

Активні комутатори дають оператору більше можливостей для керування мережею. Наприклад, можна окремо налаштувати швидкість для кожного порту, створити VLAN для різних абонентів, обмежити доступ, застосувати пріоритети для голосового або відеотрафіку. Це зручно для бізнес-центрів, офісних будівель, кампусів і промислових об'єктів. Але комутатори потребують електроживлення, захисту, охолодження та регулярного обслуговування.

Порівняно зі сплітером, активний комутатор є складнішим і дорожчим елементом. Якщо він виходить з ладу, можуть втратити зв'язок усі користувачі, які через нього підключені. Тому в активних мережах важливо передбачати

резервування живлення, моніторинг обладнання та можливість швидкого доступу для ремонту. У PON-мережах таких проблем на пасивній розподільчій ділянці менше, оскільки сплітери не потребують живлення.

Окремим компонентом є оптичні модулі. Вони встановлюються в OLT, комутатори або інше активне обладнання і забезпечують передавання та приймання оптичного сигналу. Для різних технологій використовуються різні типи модулів, які відрізняються швидкістю, довжинами хвиль, дальністю, потужністю передавача та чутливістю приймача. Неправильно підібраний оптичний модуль може призвести до нестабільної роботи або несумісності з іншими елементами мережі.

Під час вибору оптичних компонентів важливо враховувати не тільки їхню ціну, а й сумісність. Наприклад, ONT повинен коректно працювати з OLT конкретного виробника або відповідати вимогам стандарту й профілю оператора. У реальних мережах повна взаємозамінність обладнання різних виробників не завжди є простою, навіть якщо воно формально підтримує один стандарт. Через це оператори часто проводять тестування обладнання перед масовим впровадженням.

Для забезпечення стабільної роботи мережі також потрібні вимірювальні прилади. До них належать оптичні тестери, рефлектометри OTDR, джерела світла, вимірювачі оптичної потужності та пристрої для перевірки конекторів. Вони потрібні під час будівництва, приймання лінії в експлуатацію та пошуку несправностей. Без вимірювань неможливо точно зрозуміти, де саме виникли втрати або пошкодження волокна.

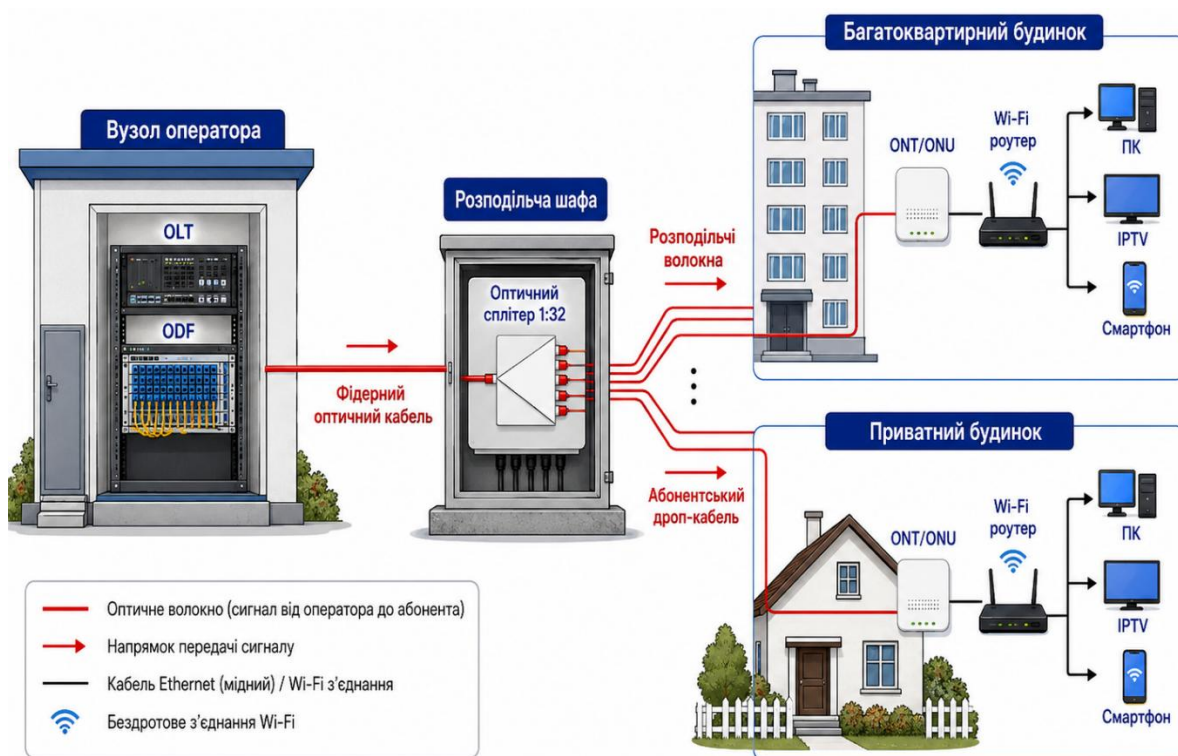


Рисунок 2.7 – Приклад розміщення основних компонентів у мережі FTTH

Для оператора найважливішим є баланс між вартістю і якістю. Дешевші компоненти можуть зменшити початкові витрати, але збільшити кількість аварій, складність обслуговування і витрати в майбутньому. Навпаки, занадто дорогі рішення не завжди економічно виправдані для масового житлового підключення. Тому вибір компонентів повинен відповідати конкретному сценарію: міська багатоповерхова забудова, приватний сектор, бізнес-клієнти, сільська місцевість або інфраструктура для мобільних мереж.

2.7 Перспективні технології оптоволоконного доступу: 40G-PON, 50G-PON, 25/50GE-PON

Розвиток оптоволоконних мереж доступу не зупиняється на GPON, XG-PON або XGS-PON. Ці технології вже дали можливість операторам перейти до гігабітного й 10-гігабітного рівня доступу, але обсяги трафіку продовжують зростати. Причинами цього є масове використання відеосервісів, хмарних

платформ, віддаленої роботи, онлайн-освіти, систем відеоспостереження, IoT-пристроїв, а також розвиток мобільних мереж 5G і майбутніх 6G-сценаріїв. Через це виникає потреба у нових поколіннях PON, які можуть забезпечити значно більшу пропускну здатність.

До перспективних технологій оптоволоконного доступу можна віднести 40G-PON, 50G-PON, 25G-PON, а також 25GE-PON і 50GE-PON за стандартами IEEE. Їхнє завдання полягає не тільки в підвищенні швидкості. Важливо також забезпечити можливість співіснування з уже побудованими мережами, не змушуючи оператора повністю замінювати пасивну оптичну інфраструктуру. Саме тому при розробці нових стандартів велика увага приділяється довжинам хвиль, оптичному бюджету, сумісності з ODN і поступовій модернізації.

Одним із важливих етапів розвитку стала технологія NG-PON2, яку часто пов'язують із 40G-PON. Вона описується рекомендаціями ITU-T G.989 і використовує підхід TWDM-PON, тобто поєднання часового та хвильового мультиплексування. Ідея полягає в тому, що в одній пасивній оптичній мережі працює кілька довжин хвиль, кожна з яких може передавати окремий потік даних. У результаті загальна пропускну здатність системи збільшується порівняно з однохвильовими рішеннями [10].

NG-PON2 є технічно потужним рішенням, але воно складніше за GPON або XGS-PON. Для його роботи потрібні більш дорогі оптичні компоненти, зокрема налаштовувані приймачі й передавачі, які можуть працювати з різними довжинами хвиль. Через це NG-PON2 не став таким масовим стандартом, як GPON або XGS-PON. Однак його значення полягає в тому, що він показав можливість використання кількох хвильових каналів у пасивній мережі доступу та став важливим кроком до більш гнучких високошвидкісних PON-систем.

Наступним важливим напрямом розвитку ITU-T став 50G-PON, який входить до групи Higher Speed PON. Рекомендація ITU-T G.9804.1 описує загальні вимоги до високошвидкісних пасивних оптичних мереж, що працюють на швидкостях понад 10 Гбіт/с. Це означає, що 50G-PON розглядається як наступний

етап після XGS-PON і NG-PON2 для мереж, де потрібна значно більша пропускна здатність.

50G-PON цікавий тим, що він орієнтований на використання вже наявної логіки PON, але з набагато вищою швидкістю. На відміну від NG-PON2, де використовуються кілька довжин хвиль, 50G-PON розглядається як більш прямий розвиток TDM-PON. Це може зробити його практичнішим для масового впровадження, тому що оператору простіше модернізувати мережу, якщо не потрібно переходити на надто складну хвильову архітектуру [12].

Застосування 50G-PON може бути доцільним у кількох сценаріях. По-перше, це густонаселені міські райони, де один PON-сегмент обслуговує багато абонентів із високим споживанням трафіку. По-друге, це бізнес-сегмент, де потрібні швидкі й стабільні канали для офісів, дата-центрів малого масштабу, хмарних сервісів і корпоративних мереж. По-третє, це мобільні мережі, де оптичний доступ може використовуватися для підключення базових станцій і транспортних ділянок.

Окремо потрібно згадати 25G-PON. Ця технологія розвивається не як класичний глобальний стандарт ITU-T у такому самому вигляді, як GPON або XGS-PON, а значною мірою через ініціативу 25GS-PON MSA. Специфікація 25GS-PON описує 25-гігабітну асиметричну й симетричну пасивну оптичну мережу для житлових, бізнесових, мобільних транспортних та інших застосувань.

Перевага 25G-PON полягає в тому, що він може бути проміжним кроком між XGS-PON і 50G-PON. Для деяких операторів перехід від 10 Гбіт/с одразу до 50 Гбіт/с може бути надто дорогим або технічно надлишковим. У такій ситуації 25G-PON може забезпечити збільшення пропускної здатності без надто різкого ускладнення системи. Особливо це актуально там, де вже є попит на швидкість понад 10 Гбіт/с, але ще немає економічної потреби у повному переході до 50G-PON.

Для мобільних мереж 25G-PON також може бути корисним, оскільки багато транспортних підключень базових станцій потребують саме швидкостей класу 10–25 Гбіт/с. Якщо оператор може використати наявну ODN і додати нове активне

обладнання, така модернізація може бути економічно привабливою. Але для цього потрібна сумісність із уже побудованою інфраструктурою, правильний вибір довжин хвиль і достатній оптичний бюджет.

Паралельно з напрямом ITU-T розвиваються перспективні технології Ethernet PON за стандартами IEEE. Найважливішими серед них є 25GE-PON і 50GE-PON, які описуються IEEE 802.3ca-2020. Цей стандарт розширює роботу Ethernet PON до багатоканальних систем по 25 Гбіт/с і підтримує як симетричні, так і асиметричні режими: 25/10, 25/25, 50/10, 50/25 і 50/50 Гбіт/с у напрямках downstream/upstream [18].

25GE-PON можна розглядати як розвиток 10GE-PON для мереж, де потрібна вища пропускна здатність, але зберігається Ethernet-орієнтована архітектура. Це важливо для операторів, які історично будували мережі на EPON і 10G-EPON. Для них перехід до 25GE-PON може бути природнішим, ніж перехід на ITU-T XGS-PON або 50G-PON, тому що зберігається знайома Ethernet-логіка керування трафіком.

50GE-PON є ще більш продуктивним варіантом. Він може забезпечити до 50 Гбіт/с у низхідному напрямку і, залежно від режиму, 10, 25 або 50 Гбіт/с у висхідному напрямку. Це дає змогу використовувати Ethernet PON не тільки для домашнього інтернету, а й для високонавантажених сценаріїв: корпоративного доступу, агрегації трафіку, підключення малих вузлів зв'язку, Wi-Fi-точок високої щільності та мобільної інфраструктури.

Важливо, що 25GE-PON і 50GE-PON зберігають ідею пасивної мережі доступу. Тобто між OLT і ONU так само може використовуватися ODN зі сплітерами. Але через значно вищі швидкості зростають вимоги до оптичних модулів, якості волокна, втрат у сплітерах, дисперсії та точності роботи приймально-передавального обладнання. Тому модернізація до 25/50GE-PON не повинна розглядатися лише як заміна OLT і ONU. Перед цим потрібно оцінити стан пасивної інфраструктури.

Ще одним важливим питанням є сумісність різних поколінь. Оператору бажано, щоб нові технології могли співіснувати з уже розгорнутими GPON, XGS-

PON, EPON або 10GE-PON. На практиці це досягається використанням різних довжин хвиль, фільтрів і комбінаторів. Такий підхід дозволяє підключати нових абонентів до перспективної технології, не вимикаючи старих користувачів. Це особливо важливо для великих операторів, у яких у мережі вже працюють тисячі або мільйони абонентських пристроїв.

З технічної точки зору перспективні PON-технології мають вирішити кілька проблем. Перша проблема - підвищення швидкості без різкого збільшення вартості обладнання. Друга - збереження сумісності з наявною ODN. Третя - підтримка різних типів трафіку: домашнього, корпоративного, мобільного, IoT і службового. Четверта - забезпечення достатньої дальності та коефіцієнта розгалуження, щоб нові стандарти були не лише швидкими, а й економічно корисними для операторів.

Не менш важливим є питання енергоспоживання. Чим вища швидкість передавання, тим складнішим стає оптичний модуль і цифрова обробка сигналу. Це може збільшувати енергоспоживання OLT і ONU. Для одного пристрою різниця може здаватися невеликою, але для великої операторської мережі з тисячами портів і сотнями тисяч абонентських терміналів це стає важливим економічним фактором.

Перспективні технології також змінюють роль мережі доступу. Раніше вона розглядалася переважно як інфраструктура для домашнього інтернету. Тепер оптоволоконний доступ може одночасно обслуговувати приватних абонентів, бізнес-клієнтів, системи відеоспостереження, “розумні” міста, промислові датчики, базові станції мобільного зв’язку та хмарні сервіси. Через це нові PON-технології повинні підтримувати не тільки високу швидкість, а й якість обслуговування, гнучке керування трафіком і надійність.

Якщо порівнювати перспективні технології між собою, то NG-PON2 є найбільш складним із погляду хвильової архітектури, але дуже гнучким. 25G-PON може бути компромісом між XGS-PON і 50G-PON. 50G-PON виглядає як основний напрям ITU-T для подальшого розвитку після 10-гігабітних систем.

25GE-PON і 50GE-PON є розвитком Ethernet PON і підходять для операторів, які використовують IEEE-орієнтовану екосистему.

При цьому не можна сказати, що всі оператори одночасно перейдуть на 50G-PON або 50GE-PON. Вибір залежатиме від реального попиту. У багатьох районах GPON або XGS-PON ще довго будуть достатніми. Перспективні технології першими впроваджуються там, де є економічна потреба: у бізнес-сегменті, густонаселених районах, транспорті мобільних мереж, кампусах, промислових зонах і місцях із високою концентрацією трафіку.

Для України та інших країн із неоднорідною інфраструктурою це питання особливо практичне. У великих містах попит на високошвидкісний доступ зростає швидше, тому модернізація до XGS-PON, 25G-PON або 50G-PON може бути виправданою раніше. У невеликих населених пунктах і приватному секторі основним завданням може залишатися саме розширення покриття FTTH, а не негайний перехід на найшвидший стандарт. Тому перспективність технології потрібно оцінювати не лише за максимальною швидкістю, а й за економічною доцільністю.

2.8 Питання сумісності мереж доступу різних стандартів

Під час розвитку оптоволоконних мереж доступу оператори стикаються не тільки з вибором нової технології, а й із питанням її сумісності з уже побудованою інфраструктурою. Це дуже важливо, тому що мережа доступу зазвичай створюється на багато років. Повна заміна кабельної частини, сплітерів, муфт, кросів і абонентського обладнання потребує великих витрат. Тому нові стандарти PON потрібно розглядати не окремо, а у зв'язку з попередніми поколіннями мереж.

Сумісність у мережах оптоволоконного доступу можна розглядати на кількох рівнях. Перший рівень - це сумісність із пасивною оптичною розподільчою мережею ODN. Другий рівень - сумісність за довжинами хвиль. Третій - сумісність активного обладнання OLT і ONT/ONU. Четвертий - сумісність

систем керування, сервісних профілів, VLAN, QoS і механізмів авторизації абонентів. Якщо хоча б один із цих рівнів не врахований, модернізація мережі може стати складною або економічно не вигідною [9].

Найважливішою для оператора є сумісність із пасивною інфраструктурою. ODN включає оптичні кабелі, сплітери, муфти, кроси, конектори, патч-корди та зварні з'єднання. Саме ця частина мережі є найдорожчою для фізичної заміни, тому що її будівництво пов'язане з прокладанням кабелю, доступом до будинків, земляними роботами, монтажем на опорах або в кабельній каналізації. Якщо ODN побудована якісно, оператор може переходити від GPON до XGS-PON або 50G-PON переважно через заміну активного обладнання. Якщо ж ODN має великі втрати або погану документацію, модернізація буде складнішою.

Для забезпечення сумісності нові покоління PON часто використовують інші довжини хвиль, ніж попередні стандарти. Це дозволяє різним технологіям працювати в одній фізичній оптичній мережі без взаємного заважання. Наприклад, GPON, XG-PON і XGS-PON можуть співіснувати в одній ODN за рахунок використання різних діапазонів довжин хвиль і спеціальних оптичних фільтрів. Такий підхід дає можливість не переводити всіх абонентів на нову технологію одночасно, а виконувати модернізацію поступово. ITU-T G.984.1 прямо орієнтує GPON на використання оптичної мережі доступу для житлових і бізнес-послуг, а також описує підтримку симетричних і асиметричних режимів гігабітного доступу.

Поступова модернізація є практично необхідною, тому що в реальній мережі абоненти мають різні тарифні плани, різні потреби та різне обладнання. Частина користувачів може залишатися на GPON, тому що їм достатньо базової швидкості. Інші абоненти, наприклад бізнес-клієнти або користувачі з високим навантаженням, можуть бути переведені на XGS-PON, 25G-PON або 50G-PON. Це дає оператору можливість збільшувати пропускну здатність мережі там, де це справді потрібно, а не витрачати кошти на масову заміну всіх пристроїв.

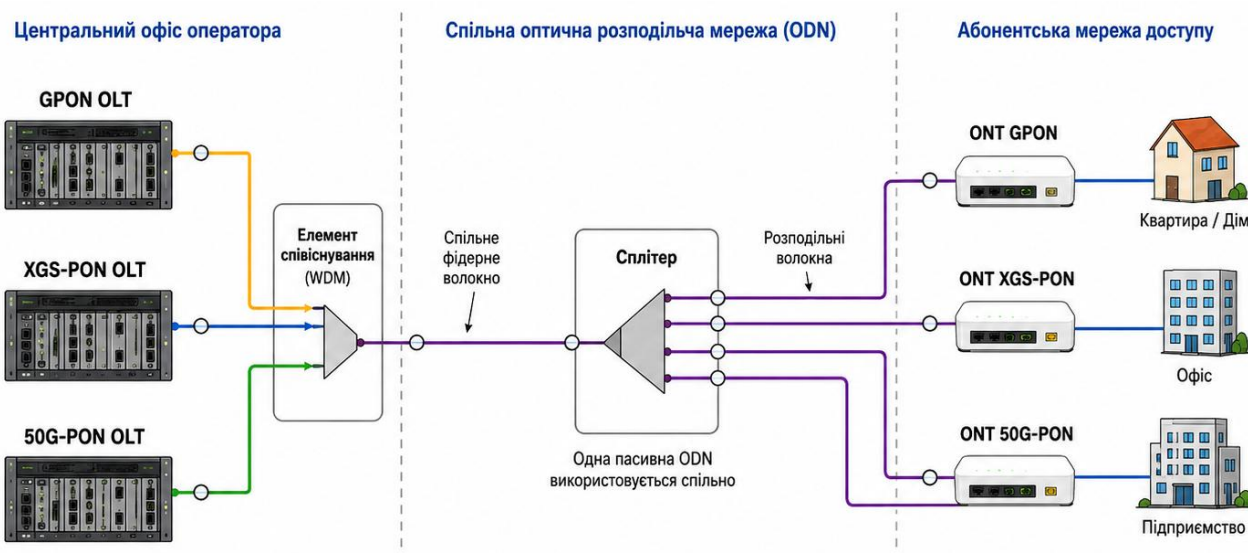


Рисунок 2.8 – Принцип співіснування різних поколінь PON в одній ODN

Однак фізичне співіснування не означає повної сумісності всього обладнання. ONT, який працює в GPON, не зможе автоматично працювати в XGS-PON або 50G-PON, якщо він не підтримує цей стандарт. Так само OLT повинен мати відповідні лінійні плати, оптичні модулі та програмну підтримку потрібної технології. Тобто абонентське обладнання й обладнання оператора мають відповідати одному стандарту або підтримувати багатостандартний режим. На практиці це означає, що під час модернізації оператор повинен планувати не тільки встановлення нових плат OLT, а й поступову заміну ONT у тих абонентів, які переходять на нову технологію [16].

Ще однією проблемою є сумісність обладнання різних виробників. Теоретично міжнародні стандарти повинні забезпечувати взаємодію OLT і ONT, якщо обидва пристрої відповідають одному стандарту. Але в реальних мережах ситуація складніша. Виробники можуть по-різному реалізовувати службові функції, профілі керування, OMCI, діагностику, оновлення програмного забезпечення, механізми безпеки та додаткові сервіси. Через це оператори часто використовують обладнання одного виробника або проводять попереднє тестування сумісності перед масовим впровадженням.

Особливо це стосується GPON, XGS-PON і 50G-PON, де важливими є не тільки фізичні параметри, а й керування абонентськими пристроями. Наприклад,

OLT повинен правильно розпізнати ONT, зареєструвати його в мережі, призначити профіль послуг, налаштувати VLAN, обмеження швидкості, пріоритети трафіку та інші параметри. Якщо ONT формально підтримує стандарт, але некоректно працює з конкретною платформою OLT, у мережі можуть виникати проблеми з сервісами або керуванням.

Для перспективних технологій важливою є не тільки сумісність із GPON чи XGS-PON, а й відповідність новим вимогам до оптичного бюджету. Наприклад, 50G-PON належить до групи Higher Speed PON. Рекомендація ITU-T G.9804.1 визначає вимоги до високошвидкісних PON-систем і передбачає різні типи таких систем, зокрема однохвильові TDMA PON, багатохвильові TWDM PON і point-to-point overlay PON . Це означає, що майбутні мережі доступу можуть розвиватися не тільки шляхом простого збільшення швидкості, а й через складніші варіанти накладання нових сервісів на вже наявну оптичну інфраструктуру.

З технічної точки зору перехід до 50G-PON є складнішим, ніж перехід від GPON до XGS-PON. Вищі швидкості потребують якісніших оптичних модулів, кращого контролю втрат, більшої точності приймання сигналу та уважнішого ставлення до стану ODN. ITU-T G.9804.3 визначає фізичний рівень 50G-PON і описує систему з номінальною швидкістю 49,7664 Гбіт/с у низхідному напрямку, а також варіантами висхідної швидкості 12,4416, 24,8832 або 49,7664 Гбіт/с . Через це перед модернізацією до 50G-PON оператору потрібно перевірити не лише активне обладнання, а й реальний стан пасивної мережі.

Питання сумісності також важливе для Ethernet PON. У випадку EPON, 10G-EPON, 25G-EPON і 50G-EPON логіка розвитку пов'язана зі стандартами IEEE. Тут також потрібно враховувати співіснування старих і нових поколінь. Наприклад, оператор, який має мережу GE-PON, може поступово переходити до 10GE-PON або 25/50GE-PON. Але для цього потрібні відповідні OLT, ONU, оптичні модулі та підтримка потрібних режимів роботи.

Однією з переваг Ethernet PON є близькість до Ethernet-екосистеми. Це спрощує інтеграцію на рівні кадрів, VLAN і IP-сервісів. Проте фізична сумісність усе одно залежить від конкретного стандарту, швидкості, довжин хвиль і

оптичного бюджету. IEEE 802.3sa-2020 розширює EPON до кількох каналів по 25 Гбіт/с і підтримує симетричні та асиметричні режими 25/10, 25/25, 50/10, 50/25 і 50/50 Гбіт/с. Тому при переході до 25G-EPON або 50G-EPON потрібно враховувати не тільки пропускну здатність, а й сумісність із уже розгорнутими EPON-сегментами.

Важливо розуміти, що ITU-T PON і IEEE EPON не є взаємозамінними стандартами на рівні абонентського обладнання. GPON-ONT не може працювати як EPON-ONU, а EPON-ONU не може автоматично підключитися до GPON-OLT. Вони використовують різні протокольні підходи, різні механізми керування та різну логіку роботи з кадрами. Тому оператор, який вибрав один напрям розвитку, зазвичай продовжує модернізацію всередині цієї ж екосистеми. Для GPON-мереж логічним шляхом є XGS-PON або 50G-PON, а для EPON-мереж - 10G-EPON, 25G-EPON або 50G-EPON [17].

Окрему роль відіграє сумісність на рівні сервісів. Навіть якщо фізична мережа підтримує новий стандарт, оператор повинен зберегти роботу послуг для абонентів: інтернету, IPTV, IP-телефонії, корпоративних VLAN, відеоспостереження, службового доступу та інших сервісів. Для цього потрібно правильно перенести або повторно налаштувати профілі обслуговування, правила QoS, параметри авторизації та обмеження швидкості. Якщо цей етап виконати неправильно, абонент може мати оптичне з'єднання, але частина послуг працюватиме некоректно.

Також потрібно враховувати сумісність із системами експлуатації та моніторингу. У великій операторській мережі важливо бачити стан OLT, ONT, портів, рівнів оптичного сигналу, аварій, помилок і завантаження сегментів. Якщо нове обладнання погано інтегрується з наявною OSS/BSS-системою оператора, експлуатація стає складнішою. Тому сумісність потрібно перевіряти не тільки на рівні “працює/не працює”, а й на рівні керування всією мережею.

Серйозним питанням є і документація ODN. Якщо оператор має точну інформацію про маршрути кабелів, місця встановлення сплітерів, коефіцієнти розгалуження, рівні сигналу та запас оптичного бюджету, модернізація проходить

значно простіше. Якщо ж мережа будувалася поступово, без якісної документації, то перед переходом на новий стандарт доведеться виконувати додаткові вимірювання й аудит. Це збільшує час і вартість проєкту.

Ще одна практична проблема - різні вимоги абонентів. Не всім користувачам потрібен перехід на новий стандарт. Для частини побутових абонентів GPON може залишатися достатнім ще багато років. Водночас бізнес-клієнти, багатоквартирні комплекси з високою щільністю користувачів, мобільні базові станції або системи відеоспостереження можуть потребувати XGS-PON, 25G-PON чи 50G-PON значно раніше. Тому оператору вигідно мати можливість змішаного використання технологій у межах однієї інфраструктури.

З економічної точки зору сумісність напряму впливає на CAPEX і OPEX. Якщо новий стандарт може працювати в наявній ODN, початкові витрати на модернізацію будуть нижчими. Якщо потрібно прокладати нові кабелі, міняти сплітери або перебудовувати вузли доступу, вартість різко зростає. Також сумісність впливає на експлуатаційні витрати: чим більше різних платформ і типів обладнання використовується в мережі, тим складніше їх обслуговувати, зберігати запасні частини й навчати персонал.

Загалом питання сумісності можна розглядати як одну з головних умов успішного розвитку оптоволоконної мережі доступу. Швидкість нового стандарту сама по собі не гарантує його практичної доцільності. Якщо технологія не може нормально співіснувати з наявною ODN, обладнанням і сервісною моделлю оператора, її впровадження може бути занадто дорогим. Тому при виборі між GPON, XGS-PON, 50G-PON, EPON, 10G-EPON і 25/50G-EPON потрібно оцінювати не лише технічні характеристики, а й реальні умови інтеграції в наявну мережу.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розкрито технічні принципи побудови оптоволоконних мереж доступу: топології, активні та пасивні схеми, стандарти PON і склад

оптичної інфраструктури. Аналіз підтвердив, що якість ODN, правильний розрахунок оптичного бюджету, вибір сплітерів і сумісність обладнання визначають стабільність роботи мережі не менше, ніж номінальна швидкість стандарту.

Розгляд технологій GPON, XG-PON, XGS-PON, GE-PON, 10GE-PON, 40G-PON, 50G-PON і 25/50GE-PON показав послідовний перехід від гігабітного доступу до високошвидкісних систем нового покоління. Для практичного впровадження ключовими залишаються сумісність із уже побудованою інфраструктурою, підтримка сервісної моделі оператора та поетапна модернізація без повної перебудови мережі.

3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕНОЛОГІЙ

3.1 Порівняння GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON

Після розгляду технічних принципів побудови оптоволоконних мереж доступу можна перейти до порівняння конкретних технологій. Це важливо, тому що кожен стандарт має свої переваги, обмеження і практичну сферу застосування. У реальних умовах оператор не обирає технологію тільки за максимальною швидкістю. Він також враховує вартість обладнання, сумісність із наявною інфраструктурою, кількість абонентів, тип забудови, перспективи модернізації та вимоги до послуг.

Найпоширенішою технологією пасивного оптичного доступу залишається GPON. Вона добре підходить для масового FTTH-підключення, тому що має відносно невисоку вартість обладнання, велику кількість сумісних ONT на ринку та достатню швидкість для більшості побутових користувачів. У типовій конфігурації GPON забезпечує 2,488 Гбіт/с у низхідному напрямку і 1,244 Гбіт/с у висхідному напрямку. Для домашнього інтернету, IPTV, IP-телефонії та базових хмарних сервісів цього часто достатньо [1].

Основною перевагою GPON є його зрілість. Технологія давно використовується операторами, має добре відпрацьовані схеми проєктування, монтажу та експлуатації. Також GPON зручно застосовувати там, де важливо підключити багато абонентів із помірними вимогами до швидкості. Але головним обмеженням є те, що пропускна здатність одного PON-порту ділиться між групою користувачів. Якщо в сегменті багато активних абонентів, у години пікового навантаження можуть виникати обмеження фактичної швидкості.

XG-PON є наступним етапом після GPON. Він забезпечує вищу швидкість у низхідному напрямку - до 10 Гбіт/с, але у висхідному напрямку зазвичай використовується швидкість близько 2,5 Гбіт/с. Через це XG-PON залишається асиметричною технологією. Його можна розглядати як варіант модернізації GPON

для мереж, де найбільше навантаження припадає саме на завантаження даних до абонента [9].

Перевага XG-PON полягає в тому, що він дозволяє збільшити пропускну здатність без повної зміни логіки PON-мережі. Він може використовувати вже наявну ODN, якщо вона відповідає вимогам за втратами та якістю оптичного тракту. Проте XG-PON не повністю вирішує проблему висхідного каналу. Для сучасних сервісів, таких як відеоконференції, хмарні резервні копії, відеоспостереження та корпоративні застосунки, асиметрія може бути недоліком.

Саме тому більш актуальним варіантом сьогодні є XGS-PON. Ця технологія забезпечує 10 Гбіт/с у низхідному і висхідному напрямках. Рекомендація ITU-T G.9807.1 визначає XGS-PON як 10-гігабітну симетричну пасивну оптичну мережу для житлових, бізнесових, мобільних транспортних та інших застосувань ([ITU](https://www.itu.int)). Це робить XGS-PON більш універсальним рішенням порівняно з XG-PON.

XGS-PON має перевагу для тих випадків, коли потрібна висока швидкість не тільки до абонента, а й від абонента до мережі. Це важливо для бізнесу, систем відеоспостереження, віддаленої роботи, хмарних платформ, IoT-шлюзів і мобільного backhaul. Також XGS-PON часто розглядають як логічний шлях модернізації GPON-мереж, тому що він може співіснувати з попередніми поколіннями PON у межах однієї оптичної інфраструктури за умови правильного хвильового планування [16].

NG-PON2 є складнішим і технологічно сильнішим рішенням. Його головна особливість полягає у використанні TWDM - поєднання часового та хвильового мультиплексування. Це означає, що в одній оптичній мережі можуть працювати кілька довжин хвиль, кожна з яких несе окремий потік даних. ITU-T G.989 описує NG-PON2 як 40-гігабітну пасивну оптичну мережу, а G.989.2 визначає її фізичний рівень.

Перевагою NG-PON2 є висока гнучкість і більша сумарна пропускну здатність. Технологія може бути корисною там, де потрібно обслуговувати різні категорії клієнтів на одній ODN: масових абонентів, бізнес-користувачів, мобільні базові станції або спеціальні сервіси. Але NG-PON2 має суттєвий недолік - високу

складність і вартість обладнання. Через використання багатохвильового підходу потрібні дорожчі оптичні компоненти, зокрема налаштовувані передавачі й приймачі. Саме тому NG-PON2 не став настільки масовим, як GPON або XGS-PON.

EPON забезпечує гігабітний рівень доступу і може використовуватися для масового підключення абонентів. Його перевага полягає у простішій інтеграції з Ethernet-сервісами, VLAN, IP-мережами та комутаторами. Проте, як і GPON, базовий EPON має обмеження за швидкістю для сучасних високонавантажених сценаріїв. Тому в мережах із великим трафіком він поступово поступається швидшим технологіям.

10G-EPON є розвитком EPON до 10-гігабітного рівня. Він може працювати в симетричних і асиметричних режимах залежно від реалізації. Його доцільно застосовувати там, де вже використовується EPON-інфраструктура і потрібне підвищення пропускної здатності без переходу на іншу технологічну екосистему. Сильна сторона 10G-EPON - збереження Ethernet-орієнтованого підходу та відносна простота інтеграції з операторськими IP-мережами.

Подальшим розвитком Ethernet PON стали 25G-EPON і 50G-EPON. Стандарт IEEE 802.3ca-2020 розширює роботу EPON до багатоканальних систем по 25 Гбіт/с і підтримує режими 25/10, 25/25, 50/10, 50/25 і 50/50 Гбіт/с у напрямках downstream/upstream. Це показує, що Ethernet PON також має перспективу для високошвидкісного доступу, особливо в мережах, які вже побудовані на IEEE-підході.

Порівняння технологій PON за швидкістю передавання даних наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння технологій PON за швидкістю передавання даних

Техн.	Організація стандарт	Downstream Гбіт/с	upstream Гбіт/с	Основна перевага	Основне обмеження
GPON	ITU-T	2,5	1,25	Масовість, низька вартість, зріла екосистема	Обмежена швидкість для сучасних високонавантажених сегментів
XG-PON	ITU-T	10	2,5	Вища швидкість до абонента	Асиметричність каналу
XGS-PON	ITU-T	10	10	Симетрична швидкість, актуальність.	Дорожче обладнання порівняно з GPON
NG-PON2	ITU-T	до 40	до 40	Багатохвильова гнучкість, висока пропускна здатність	Висока складність і вартість
EPON / GE-PON	IEEE	1	1	Ethernet-орієнтована архітектура	Недостатня швидкість для нових сценаріїв
10G-EPON	IEEE	10	1 або 10	Розвиток EPON до 10G, добра інтеграція з Ethernet	Залежність від EPON-екосистеми
25/50G-EPON	IEEE	25 або 50	10, 25, 50	Перспективний високошвидкісний Ethernet PON	Вищі вимоги до ODN і обладнання

Як видно з порівняння, GPON залишається оптимальним варіантом для багатьох масових підключень, але він уже не завжди відповідає вимогам перспективних сервісів. XG-PON підвищує швидкість до абонента, але має обмеження у висхідному напрямку. XGS-PON виглядає більш збалансованим рішенням, оскільки забезпечує симетричні 10 Гбіт/с і підходить для ширшого набору сценаріїв. NG-PON2 є дуже потужним, але складним і дорогим варіантом. EPON і 10G-EPON мають перевагу в Ethernet-сумісності, але їх доцільність залежить від уже наявної інфраструктури оператора.

Окремо потрібно враховувати масштабованість. GPON можна масштабувати за рахунок збільшення кількості OLT-портів, оптимізації розгалуження або переходу на XGS-PON. XGS-PON дає більше можливостей для підключення абонентів із високим трафіком без різкого перевантаження сегмента. NG-PON2 і

50G-рішення створюють ще більший запас, але їх впровадження має сенс лише там, де є реальний попит на такі швидкості.

Також потрібно порівнювати технології за сценаріями використання. GPON найкраще підходить для масового домашнього інтернету. XGS-PON - для нових FTTH-мереж, бізнес-послуг, дорогих тарифів, мобільного транспорту та районів із високим навантаженням. NG-PON2 - для складних операторських сценаріїв, де потрібна багатохвильова гнучкість. EPON і 10G-EPON - для Ethernet-орієнтованих мереж, де важлива сумісність із наявною IP/Ethernet-інфраструктурою.

Якщо розглядати перспективу на найближчі роки, найбільш практичним напрямом для багатьох операторів виглядає перехід від GPON до XGS-PON. Це пояснюється тим, що XGS-PON уже забезпечує симетричну 10-гігабітну швидкість і не є настільки складним, як NG-PON2. Для мереж із дуже високими вимогами наступним кроком може бути 50G-PON. ITU-T G.9804.3 описує 50G-PON як систему з номінальною швидкістю 50 Гбіт/с у downstream і варіантами 12,5, 25 або 50 Гбіт/с в upstream ([ITU](#)).

У підсумку можна сказати, що жодна технологія не є універсально найкращою. GPON виграє за ціною та масовістю. XGS-PON - за балансом між швидкістю, симетричністю і практичністю модернізації. NG-PON2 - за гнучкістю, але програє за складністю. EPON і 10G-EPON зручні для Ethernet-орієнтованих мереж. 25/50G-EPON і 50G-PON є перспективними для майбутніх високошвидкісних сценаріїв, але їх масове впровадження залежить від вартості обладнання і реального попиту.

3.2 Ключові критерії оцінки технологій оптоволоконного доступу

Порівнювати технології оптоволоконного доступу тільки за максимальною швидкістю неправильно. У реальній мережі оператор оцінює не один параметр, а цілу групу критеріїв. Технологія може мати дуже високу пропускну здатність, але бути занадто дорогою для масового впровадження. Або, навпаки, дешевше рішення може бути достатнім для побутових абонентів, але не підходити для

бізнес-клієнтів чи мобільної інфраструктури. Тому для об'єктивного аналізу потрібно враховувати швидкість передавання, дальність, масштабованість, CAPEX, OPEX, енергоспоживання, надійність, резервування, QoS і SLA.

Першим важливим критерієм оцінки технологій оптоволоконного доступу є швидкість передавання даних. Вона визначає, який обсяг інформації може передаватися через PON-сегмент. Наприклад, GPON зазвичай забезпечує 2,488 Гбіт/с у низхідному напрямку та 1,244 Гбіт/с у висхідному, тоді як XGS-PON підтримує симетричну швидкість 10 Гбіт/с в обох напрямках. Для перспективних Ethernet PON технологій, таких як 25G-EPON і 50G-EPON, швидкість може досягати 25 або 50 Гбіт/с залежно від режиму роботи.

Другим критерієм є симетричність каналу. Раніше асиметричні технології були достатніми, оскільки користувачі переважно завантажували контент із мережі. Сьогодні зросла роль висхідного каналу, адже активно використовуються відеоконференції, хмарні сервіси, резервне копіювання, відеоспостереження та IoT-пристрої. Тому XGS-PON має перевагу над GPON і XG-PON, оскільки забезпечує однакову швидкість у двох напрямках.

Третім критерієм є дальність передавання. У більшості PON-мереж типова відстань між OLT і ONT становить до 20 км. Проте реальна дальність залежить не лише від стандарту, а й від оптичного бюджету, коефіцієнта розгалуження, кількості з'єднань, якості волокна та втрат у сплітерах. Чим більше розгалуження, тим більші втрати сигналу, тому цей параметр потрібно враховувати під час проєктування ODN.

Четвертим критерієм є масштабованість. Вона показує, наскільки легко мережу можна розширити або модернізувати. GPON добре підходить для масового підключення, але має обмеження за пропускнуою здатністю. XGS-PON забезпечує більший запас швидкості, а NG-PON2, 50G-PON і 25/50G-EPON мають ще вищий потенціал, хоча потребують дорожчого обладнання та якіснішої пасивної інфраструктури.

П'ятим критерієм є CAPEX, тобто початкові витрати на розгортання мережі. До них належать витрати на OLT, ONT/ONU, кабелі, сплітери, муфти, кроси,

монтаж і проектування. GPON зазвичай має найнижчий CAPEX, оскільки обладнання для нього масове й доступне. XGS-PON дорожчий, але краще підходить для мереж із запасом на майбутнє. NG-PON2 і 50G-рішення доцільні лише там, де висока пропускна здатність справді потрібна.

Шостим критерієм є OPEX, тобто експлуатаційні витрати. Вони включають витрати на електроенергію, ремонт, моніторинг, обслуговування обладнання та підтримку абонентів. PON-мережі мають перевагу, бо між OLT і ONT немає активного обладнання, яке потребує живлення. Це зменшує витрати порівняно з активними мережами.

Також важливими критеріями є енергоспоживання, надійність і резервування. Пасивні мережі споживають менше енергії на розподільчій ділянці, оскільки сплітери не потребують живлення. Надійність PON є досить високою через меншу кількість активних елементів, але пошкодження фідерного волокна або порту OLT може вплинути одразу на групу абонентів. Для бізнес-клієнтів і критичної інфраструктури важливим є резервування через дублювання трас або використання кільцевих топологій.

Окремо слід враховувати підтримку QoS і SLA. QoS потрібен для пріоритезації різних типів трафіку: голосу, відео, IPTV, корпоративних даних та IoT. SLA важливий переважно для бізнес-клієнтів, яким потрібні гарантована швидкість, доступність послуги та визначений час відновлення після аварії. Саме тому для корпоративного сегмента XGS-PON, 10G-EPON або активні Ethernet-рішення часто є доцільнішими, ніж звичайний GPON.

Порівняння технологій PON за швидкістю передавання даних наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння технологій PON за швидкістю передавання даних

Критерій	Що оцінюється	Чому це важливо
Швидкість downstream/upstream	Пропускна здатність до абонента і від абонента	Визначає можливість підтримки сучасних сервісів
Симетричність	Рівність швидкостей у двох напрямках	Важлива для хмарних сервісів, відеозв'язку, бізнесу
Дальність	Максимальна відстань між OLT і ONT	Впливає на покриття та проєктування ODN
Масштабованість	Можливість розширення і модернізації	Дозволяє розвивати мережу без повної перебудови
CAPEX	Початкові витрати на будівництво	Визначає економічну доцільність впровадження
OPEX	Витрати на експлуатацію	Впливає на довгострокову вартість мережі
Енергоспоживання	Споживання OLT, ONT та проміжного обладнання	Важливе для великих мереж і ТСО
Надійність	Стійкість до відмов і аварій	Впливає на якість послуг для абонентів
Резервування	Можливість дублювання критичних ділянок	Потрібне для бізнесу та критичної інфраструктури
QoS	Пріоритезація і керування трафіком	Потрібне для голосу, відео, IPTV, корпоративних сервісів
SLA	Гарантований рівень послуг	Важливий для бізнес-клієнтів і операторських сервісів

Якщо застосувати ці критерії до основних технологій, можна зробити кілька практичних висновків. GPON має найкраще співвідношення ціни й достатньої швидкості для масового домашнього доступу. XGS-PON краще підходить для нових мереж, бізнес-підключень і районів із високим навантаженням. NG-PON2 має великий технічний потенціал, але його складність і вартість обмежують масове використання. EPON і 10G-EPON доцільні там, де операторська інфраструктура вже побудована на Ethernet-підході. 25/50G-EPON і 50G-PON є перспективними, але їх потрібно впроваджувати там, де є реальна потреба у таких швидкостях.

Важливо також враховувати, що критерії можуть мати різну вагу для різних сценаріїв. Для приватного абонента головними будуть ціна, стабільність і достатня швидкість. Для бізнес-клієнта - SLA, симетричність, резервування і підтримка QoS. Для оператора мобільного зв'язку - затримка, надійність, висхідна швидкість і можливість підключення базових станцій. Для сільської місцевості - дальність, вартість будівництва і мінімальні експлуатаційні витрати.

Тому порівняльний аналіз має виконуватися не абстрактно, а з урахуванням конкретного сценарію розгортання. Одна й та сама технологія може бути оптимальною в одному випадку і не вигідною в іншому. Наприклад, GPON може бути достатнім для невеликого житлового району, але не підходити для бізнес-центру з високими вимогами до симетричного каналу. XGS-PON може бути надлишковим для малонавантаженого приватного сектору, але дуже доречним для новобудови або корпоративного сегмента.

У підсумку ключові критерії оцінки дозволяють перейти від простого опису стандартів до реального вибору технології. Саме поєднання технічних і економічних параметрів показує, яка технологія є доцільною для конкретної мережі. Для повного порівняння далі потрібно подати графіки й таблиці, які наочно покажуть різницю між стандартами за швидкістю, вартістю, дальністю та іншими параметрами.

3.3 Графіки та таблиці порівняння технологій PON

Для того щоб порівняльний аналіз був зрозумілим, недостатньо лише описати кожную технологію словами. Зручніше подати основні параметри у вигляді таблиць і графіків. Це дозволяє швидко побачити різницю між GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON, 25G-EPON, 50G-EPON і 50G-PON за швидкістю, дальністю, вартістю впровадження, масштабованістю та доцільністю використання.

Найпростішим критерієм для порівняння є швидкість передавання. Саме на неї найчастіше звертають увагу користувачі, коли обирають тариф або оцінюють якість інтернет-підключення. Але для оператора важлива не тільки максимальна швидкість у низхідному напрямку, а й швидкість у висхідному напрямку. Це особливо актуально для хмарних сервісів, відеоконференцій, систем відеоспостереження, корпоративних каналів та IoT-пристроїв.

Порівняння технологій PON за швидкістю передавання даних наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння технологій PON за швидкістю передавання даних

Технологія	Downstream	Upstream	Характер каналу	Основне застосування
EPON / GE-PON	1 Гбіт/с	1 Гбіт/с	симетричний	базовий Ethernet-доступ
GPON	2,5 Гбіт/с	1,25 Гбіт/с	асиметричний	масовий FTTH-доступ
XG-PON	10 Гбіт/с	2,5 Гбіт/с	асиметричний	модернізація GPON-сегментів
XGS-PON	10 Гбіт/с	10 Гбіт/с	симетричний	бізнес, FTTH нового покоління, мобільний транспорт
10G-EPON	10 Гбіт/с	1 або 10 Гбіт/с	асиметричний або симетричний	модернізація EPON-мереж
NG-PON2	до 40 Гбіт/с сумарно	до 40 Гбіт/с сумарно	залежить від конфігурації	високонавантажені та спеціальні мережі
25G-EPON / 25G-PON	25 Гбіт/с	10 або 25 Гбіт/с	асиметричний або симетричний	бізнес, мобільна інфраструктура, високі тарифи
50G-EPON / 50G-PON	50 Гбіт/с	10, 25 або 50 Гбіт/с	асиметричний або симетричний	перспективні високошвидкісні мережі

З таблиці видно, що GPON залишається достатнім для багатьох стандартних підключень, але за швидкістю він помітно поступається новішим технологіям. XGS-PON виглядає більш збалансованим варіантом, тому що забезпечує симетричну швидкість 10 Гбіт/с. Це важливо не тільки для бізнесу, а й для сучасних домашніх користувачів, які активно передають дані в хмару, використовують відеозв'язок і мають багато підключених пристроїв.

Якщо оцінювати тільки низхідну швидкість, то найбільшу перевагу мають 50G-PON і 50G-EPON. Але така швидкість не завжди потрібна для звичайного абонента. Наприклад, для перегляду відео, вебсервісів, онлайн-навчання та більшості домашніх задач достатньо GPON або XGS-PON. Водночас для густонаселених районів, корпоративних підключень, базових станцій мобільного зв'язку або великих систем відеоспостереження вища пропускна здатність може бути важливою.

Окремо потрібно порівнювати висхідну швидкість. Саме вона часто стає слабким місцем у старіших або асиметричних технологіях. Наприклад, GPON має 1,25 Гбіт/с upstream на весь PON-сегмент, а XG-PON - близько 2,5 Гбіт/с. Для звичайного домашнього інтернету це ще може бути прийнятним, але для бізнес-клієнтів або систем відеоспостереження цього може бути недостатньо.

Порівняння за upstream показує, чому XGS-PON став важливим етапом розвитку. Він не просто збільшив швидкість порівняно з GPON, а зробив канал симетричним. У сучасних умовах це має велике значення. Наприклад, під час відеоконференції користувач не тільки приймає відео, а й передає його. Камери відеоспостереження також створюють постійний висхідний трафік.

Порівняння технологій PON за типовою дальністю наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння технологій PON за типовою дальністю

Технологія	Типова дальність	Типове розгалуження	Коментар
EPON / GE-PON	до 20 км	1:32	залежить від класу оптики та ODN
GPON	до 20 км	1:32 або 1:64	найпоширеніший варіант для FTTH
XG-PON	до 20 км	1:32 або 1:64	потребує якіснішої ODN порівняно з GPON
XGS-PON	до 20 км	1:32 або 1:64	підходить для модернізації за умови достатнього бюджету
NG-PON2	до 20 км і більше залежно від класу	1:32 або 1:64	складніша хвильова архітектура
25G-PON / 25G-EPON	до 20 км	1:32 або 1:64	вищі вимоги до фізичного рівня
50G-PON / 50G-EPON	до 20 км	1:32 або 1:64	потребує якісної ODN і точного розрахунку втрат

Наступним критерієм є дальність. Більшість PON-технологій орієнтуються на практичну дальність близько 20 км між OLT і ONT. Але це не означає, що будь-яка мережа автоматично працюватиме на такій відстані. Реальна дальність залежить від оптичного бюджету, класу оптичних модулів, коефіцієнта розгалуження, кількості з'єднань, якості волокна та монтажу.

Дальність і розгалуження потрібно розглядати разом. Якщо оператор хоче підключити більше абонентів до одного порту OLT, він використовує більший коефіцієнт розгалуження, наприклад 1:64. Але такий сплітер створює більші втрати, ніж 1:32 або 1:16. Через це може зменшитися допустима дальність або запас за оптичною потужністю. Тому при проектуванні завжди потрібно знаходити баланс між економією портів OLT і стабільністю роботи лінії.

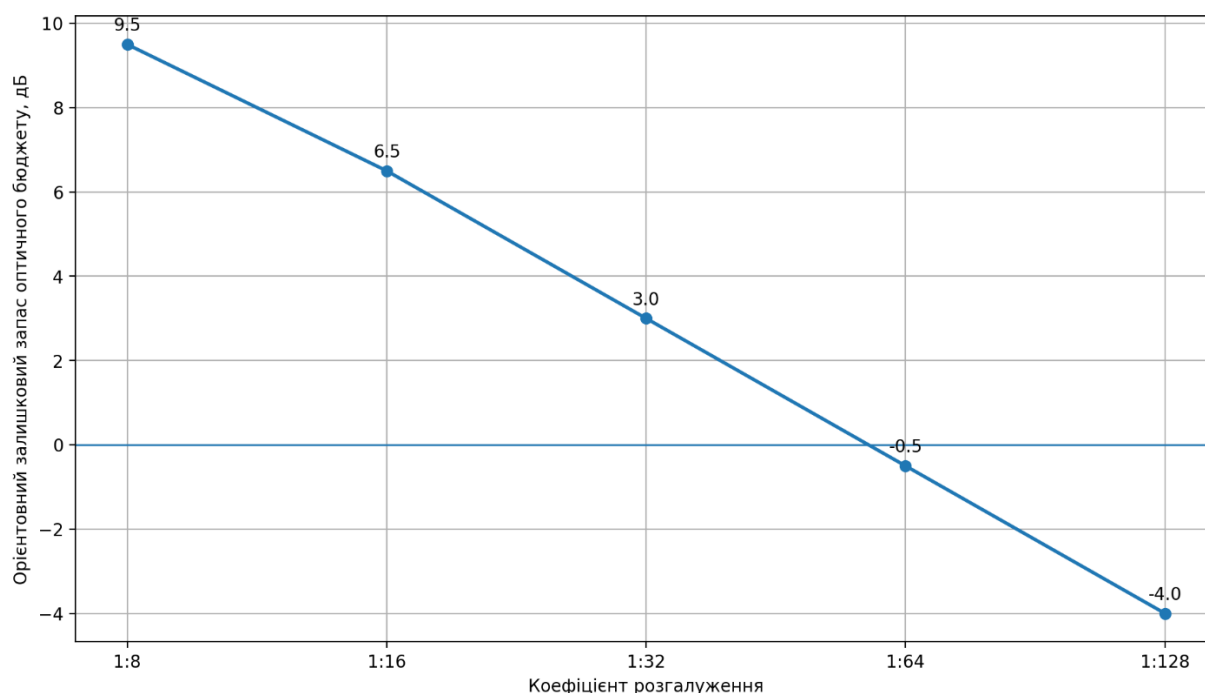


Рисунок 3.1 – Вплив коефіцієнта розгалуження на оптичний бюджет PON-мережі

Ще одним важливим критерієм є вартість. У дипломній роботі складно точно визначити реальні ціни на обладнання, тому що вони залежать від виробника, країни, обсягу закупівлі, курсу валют і комерційних умов. Але можна виконати якісне порівняння за відносним рівнем витрат. Відносне порівняння технологій за вартістю впровадження наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Відносне порівняння технологій за вартістю впровадження

Технологія	Відносний CAPEX	Відносний OPEX	Загальна економічна оцінка
GPON	низький	низький	найвигідніший варіант для масового доступу
EPON / GE-PON	низький або середній	низький	вигідний для Ethernet-орієнтованих мереж
XG-PON	середній	низький	доцільний для підвищення downstream
XGS-PON	середній або підвищений	низький	добрий баланс швидкості й вартості
10G-EPON	середній	низький	доцільний для модернізації EPON
NG-PON2	високий	середній	технічно сильний, але дорогий
25G-PON / 25G-EPON	підвищений	низький або середній	доцільний для високонавантажених сегментів
50G-PON / 50G-EPON	високий	середній	перспективний, але не завжди потрібний для масового доступу

За економічним критерієм GPON залишається сильним рішенням, тому що має зрілий ринок обладнання і нижчу вартість абонентських терміналів. Саме тому оператори часто продовжують використовувати GPON там, де немає потреби у швидкості 10 Гбіт/с або більше. XGS-PON дорожчий, але він дає кращу перспективу розвитку. NG-PON2, 25G-PON і 50G-PON мають сенс тоді, коли більша швидкість справді може принести економічний ефект.

Окремо потрібно враховувати енергоспоживання. Усі PON-технології мають перевагу над активними мережами, тому що не потребують електроживлення в пасивній розподільчій ділянці. Однак між самими PON-технологіями також є різниця. Чим вища швидкість і складніша оптична модуляція або приймально-передавальна частина, тим більшим може бути енергоспоживання обладнання OLT і ONT.

Порівняння технологій за енергоспоживанням наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Якісне порівняння технологій за енергоспоживанням

Технологія	Рівень енергоспоживання	Пояснення
GPON	низький	зріле обладнання, невисока швидкість порівняно з новими стандартами
EPON	низький	проста Ethernet-орієнтована архітектура
XG-PON	середній	вища швидкість потребує складнішої оптики
XGS-PON	середній	симетричні 10 Гбіт/с збільшують вимоги до обладнання
10G-EPON	середній	10-гігабітний фізичний рівень
NG-PON2	підвищений	багатохвильова архітектура і складніші оптичні компоненти
25/50G-PON, 25/50G-EPON	підвищений	висока швидкість і складніші модулі

Для домашнього абонента різниця в енергоспоживанні одного ONT може бути не дуже помітною. Але для оператора різниця на рівні тисяч портів OLT і великої кількості абонентських пристроїв перетворюється на суттєвий фактор. Тому при порівнянні технологій потрібно враховувати не лише швидкість, а й енергоефективність.

Ще один важливий критерій - надійність. Усі PON-технології мають загальну перевагу: відсутність активного обладнання між OLT і ONT. Це зменшує кількість точок відмови. Але надійність конкретної мережі залежить не тільки від стандарту, а й від якості ODN, правильного монтажу, резервування фідерних ліній, захисту муфт і кросів, а також роботи аварійних служб оператора.

Порівняння технологій за придатністю до різних сценаріїв наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Порівняння технологій за придатністю до різних сценаріїв

Сценарій застосування	Найбільш доцільні технології	Пояснення
Масовий домашній інтернет	GPON, EPON	достатня швидкість і нижча вартість
Нові житлові комплекси	XGS-PON, GPON	XGS-PON дає більший запас на майбутнє
Бізнес-клієнти	XGS-PON, 10G-EPON, активний Ethernet	потрібні симетричність, SLA, QoS
Відеоспостереження	XGS-PON, 10G-EPON, 25G-PON	важливий висхідний канал
Приватний сектор	GPON, XGS-PON	вибір залежить від щільності абонентів і бюджету
Мобільний backhaul	XGS-PON, 25G-PON, 50G-PON	потрібна висока швидкість і надійність
Високонавантажені райони	XGS-PON, NG-PON2, 50G-PON	потрібен більший ресурс на один сегмент
Ethernet-орієнтовані мережі	EPON, 10G-EPON, 25/50G-EPON	простіша інтеграція з Ethernet-інфраструктурою

З цієї таблиці видно, що GPON залишається логічним вибором для масового доступу, але не завжди є найкращим варіантом для нових або високонавантажених мереж. XGS-PON виглядає більш універсально, бо підходить і для домашніх, і для бізнесових сценаріїв. EPON і 10G-EPON мають сенс там, де оператор уже використовує Ethernet PON. NG-PON2 і 50G-рішення краще розглядати як перспективні технології для спеціальних або дуже навантажених сегментів.

Таблиця 3.8 – Вибір технології PON залежно від сценарію впровадження

Сценарій впровадження	Найдоцільніші технології	Пояснення вибору
Масовий домашній інтернет	GPON, EPON	Низька вартість обладнання та достатня швидкість для базових послуг
Новий житловий комплекс	XGS-PON, GPON	XGS-PON дає запас швидкості, GPON може бути дешевшим стартовим варіантом
Бізнес-клієнти	XGS-PON, 10G-EPON	Потрібні симетрична швидкість, QoS та можливість надання SLA
Відеоспостереження	XGS-PON, 25G-PON	Важливий високий висхідний канал для передавання відеопотоків
Приватний сектор	GPON, XGS-PON	Вибір залежить від щільності абонентів, довжини ліній та бюджету
Мобільний транспорт	XGS-PON, 25G-PON, 50G-PON	Потрібна висока пропускна здатність, надійність і можливість резервування
Високонавантажені райони	XGS-PON, NG-PON2, 50G-PON	Потрібен більший ресурс на один сегмент мережі
Ethernet-орієнтовані мережі	EPON, 10G-EPON, 25/50G-EPON	Краще підходять для операторів, які вже використовують Ethernet PON

Якщо узагальнити всі параметри, можна скласти підсумкову порівняльну таблицю. Вона не замінює повний техніко-економічний розрахунок, але допомагає швидко оцінити сильні й слабкі сторони кожної технології.

Таблиця 3.9 – Узагальнене порівняння технологій оптоволоконного доступу

Технологія	Швидкість	Вартість	Масштабованість	Доцільність використання
GPON	середня	низька	середня	масовий доступ
XG-PON	висока downstream	середня	середня	модернізація завантажених сегментів
XGS-PON	висока симетрична	середня	висока	нові FTTH-мережі, бізнес
NG-PON2	дуже висока	висока	висока	спеціальні високонавантажені сценарії
EPON	середня	низька	середня	Ethernet-доступ
10G-EPON	висока	середня	висока	Ethernet-орієнтовані мережі
25/50G-EPON	дуже висока	висока	дуже висока	перспективні Ethernet PON
50G-PON	дуже висока	висока	дуже висока	майбутні високошвидкісні мережі

На основі цієї таблиці можна зробити практичний висновок: вибір технології має залежати від конкретної задачі. Якщо оператору потрібно швидко й економічно підключити багато побутових абонентів, GPON усе ще є раціональним

вибором. Якщо мережа будується з розрахунком на майбутнє, доцільно розглядати XGS-PON. Якщо потрібно обслуговувати високонавантажені сегменти або мобільну інфраструктуру, можуть бути актуальними 25G-PON, 50G-PON або 25/50G-EPON. Якщо оператор уже має EPON-екосистему, перехід до 10G-EPON або 50G-EPON може бути логічнішим, ніж зміна технологічного напрямку.

Також важливо, що графіки й таблиці не повинні бути відірвані від тексту. Вони мають пояснювати те, що аналізується в роботі. Наприклад, після таблиці швидкостей потрібно зробити висновок про симетричність і придатність технологій для різних сервісів. Після таблиці вартості потрібно пояснити, чому найдорожча технологія не завжди є найкращою. Після таблиці сценаріїв потрібно показати, що вибір залежить від умов розгортання.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано порівняльний аналіз основних технологій PON за швидкістю, симетричністю каналів, масштабованістю, вартістю, енергоспоживанням, надійністю та підтримкою QoS. Порівняння показало, що GPON залишається ефективним рішенням для масового доступу, XGS-PON забезпечує збалансований перехід до 10-гігабітного рівня, а NG-PON2, 50G-PON і 25/50GE-PON орієнтовані на мережі з високим навантаженням.

Побудовані таблиці та графіки підтвердили, що вибір технології не зводиться до максимальної швидкості. Для оператора вирішальними є реальне навантаження сегмента, вимоги абонентів, ресурс наявної ODN, вартість обладнання, сценарій модернізації та строк окупності впровадження.

4 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТОВОЛОКОННИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

4.1 Моделі розгортання в міських і сільських регіонах

Практичне впровадження оптоволоконної мережі доступу залежить від умов території. У місті, приватному секторі та сільській місцевості одна й та сама технологія може мати різну ефективність. Тому оператор під час планування враховує щільність абонентів, довжину кабельних трас, спосіб прокладання кабелю, доступ до будинків, стан інфраструктури та очікувану окупність проекту.

У міських регіонах головною перевагою є висока щільність користувачів. У багатоквартирному будинку або житловому комплексі на невеликій площі може бути багато потенційних абонентів. Це зменшує вартість підключення одного користувача, оскільки витрати на фідерний кабель, сплітери, муфти, кроси та монтаж розподіляються між великою кількістю клієнтів. У таких умовах доцільно застосовувати FTTH або FTTB [4].

FTTB частіше використовується у старій багатоквартирній забудові. У цій схемі оптичне волокно підводиться до будівлі, а далі абоненти підключаються через внутрішньобудинкову Ethernet-мережу. FTTH є більш перспективним варіантом, тому що волокно підводиться безпосередньо до квартири або приватного будинку. Така модель краще підходить для нових житлових комплексів і мереж, які будуються з розрахунком на майбутню модернізацію до XGS-PON або інших швидших стандартів [9].

У сільській місцевості основною проблемою є нижча щільність абонентів і більші відстані між будинками. Через це збільшується довжина кабелю на одного користувача, а вартість будівництва стає вищою. Для таких умов важливо правильно розміщувати сплітери, муфти та розподільчі бокси, а також уважно розраховувати оптичний бюджет. Зазвичай у сільських регіонах доцільно використовувати менший коефіцієнт розгалуження, наприклад 1:16 або 1:32.

У селах і приватному секторі часто застосовується підвісне прокладання кабелю на опорах. Це дешевше та швидше, ніж земляні роботи, але така мережа

більше залежить від погодних умов, стану опор і механічних пошкоджень. Тому важливими стають якісний кабель, надійна арматура, захищені муфти та точна документація ліній.

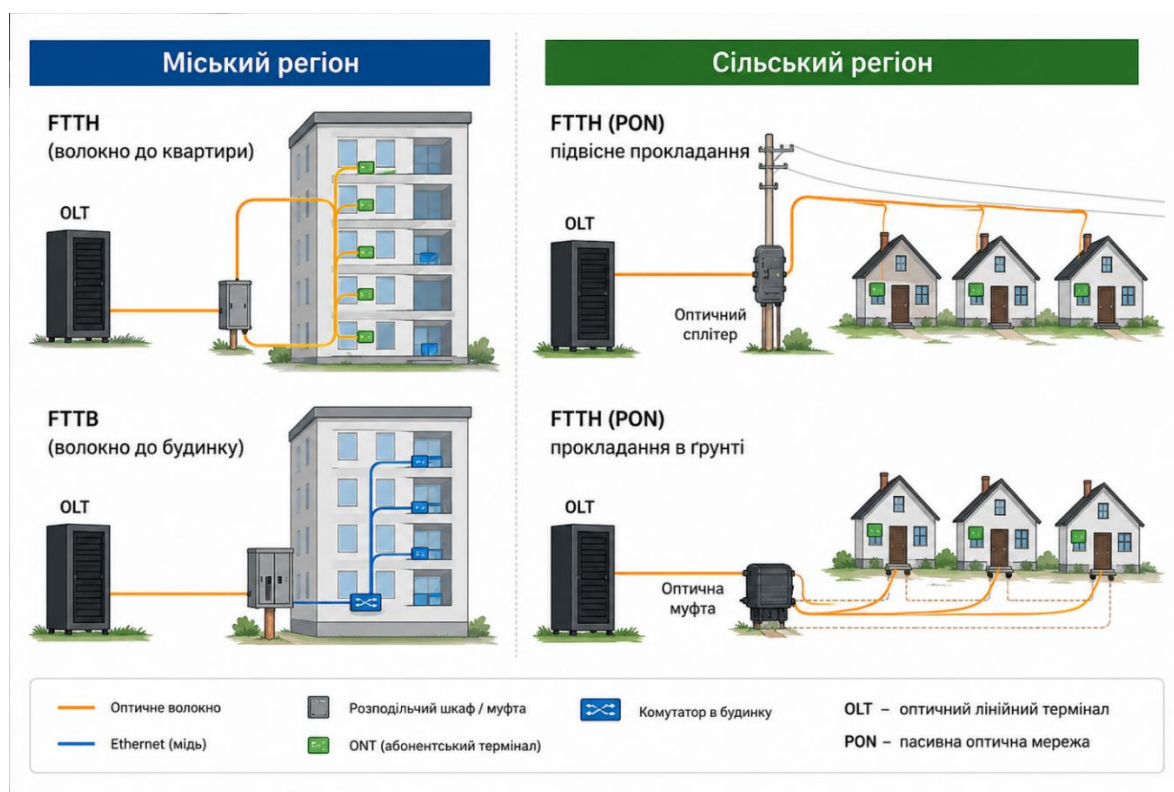


Рисунок 4.1 – Моделі розгортання оптоволоконних мереж доступу в міських і сільських регіонах

Основні відмінності між міськими та сільськими моделями розгортання наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння моделей розгортання оптоволоконних мереж у міських і сільських регіонах

Критерій	Міський регіон	Сільський регіон
Щільність абонентів	Висока	Низька або середня
Вартість підключення одного абонента	Нижча	Вища
Типова архітектура	FTTH, FTTB	FTTH, іноді FTTC
Основна проблема	Доступ до будинків, внутрішня інфраструктура	Великі відстані, окупність
Спосіб прокладання	Каналізація, підвали, стояки, фасади	Опори, ґрунт, наявні траси
Доцільні технології	GPON, XGS-PON	GPON, XGS-PON за потреби
Коефіцієнт розгалуження	Часто 1:32 або 1:64	Часто 1:16 або 1:32

У міських регіонах оптоволоконні мережі вигідніше розгортати через високу концентрацію користувачів. У сільській місцевості головними обмеженнями є довгі траси, вища вартість будівництва та складніша окупність. Тому модель розгортання потрібно вибирати не тільки за швидкістю технології, а й за реальними умовами території.

4.2 Приклади впровадження в Україні та Європі

Впровадження оптоволоконних мереж доступу в Україні та Європі має спільний напрям – поступовий перехід до FTTH/FTTB і PON-рішень. Однак причини такого переходу частково відрізняються. У Європі основний акцент робиться на цифровізації, розвитку конкуренції та модернізації фіксованої інфраструктури. В Україні, крім швидкості та якості доступу, особливо важливим став фактор стійкості мереж під час перебоїв електроживлення.

Для України технології xPON мають практичну перевагу, тому що пасивна розподільча ділянка не потребує електроживлення. Якщо вузол оператора має резервне живлення, а абонент може заживити ONT і роутер, інтернет-з'єднання може працювати навіть під час відключень світла. За повідомленням Міністерства цифрової трансформації України, у 2024 році 4,2 млн українців перейшли на xPON-інтернет саме як на більш стійке рішення під час знеструмлень [25].

В українських містах найчастіше поєднуються FTTB, FTTH і GPON. У багатоквартирній забудові оператору вигідніше підключати багато абонентів через одну розподільчу інфраструктуру, тому витрати на одного користувача нижчі. У приватному секторі та сільській місцевості частіше застосовується FTTH/PON із прокладанням кабелю на опорах або вздовж наявних інженерних трас. Для таких умов важливими залишаються якість ODN, правильне розміщення сплітерів, запас оптичного бюджету та можливість швидкого аварійного відновлення.

У Європі FTTH/FTTB розглядається як базова інфраструктура для цифрової економіки. За даними FTTH Council Europe, у 2024 році покриття FTTH/B у групі EU39 становило 69,9%, а в EU27+UK – 64,5% [22]. Це показує, що волоконні

мережі вже стали масовим напрямом розвитку фіксованого доступу, хоча в багатьох країнах ще залишається проблема фактичного підключення абонентів до вже побудованої інфраструктури.

Європейський досвід також важливий для розвитку сільських територій. У таких регіонах будівництво FTTH є дорожчим через нижчу щільність населення, але саме оптична інфраструктура дозволяє зменшити цифровий розрив між містом і селом. Для цього використовуються регуляторна підтримка, інвестиційні програми та спільне використання наявної інфраструктури [23].

Таблиця 4.2 – Особливості впровадження оптоволоконного доступу в Україні та Європі

Критерій	Україна	Європа
Основний напрям розвитку	FTTH/FTTB, GPON, xPON	FTTH/FTTB, GPON, XGS-PON
Головний стимул	Стійкість зв'язку, модернізація, конкуренція	Цифровізація, регуляторна підтримка, конкуренція
Міські мережі	Активне використання FTTB, FTTH і GPON	Масове розширення FTTH/B
Сільські регіони	Поступове розширення покриття	Зменшення цифрового розриву
Основна проблема	Війна, пошкодження інфраструктури, живлення	Різниця між покриттям і фактичним підключенням
Перспективні технології	GPON, XGS-PON	XGS-PON, 25G/50G-PON у перспективі

Україна та Європа рухаються в одному технологічному напрямі, але мають різні практичні акценти. Для України особливо важливими є стійкість зв'язку, резервне живлення та швидке відновлення інфраструктури. Для Європи головними завданнями є розширення FTTH/B-покриття, підвищення рівня фактичних підключень і підготовка мереж до майбутніх високошвидкісних сервісів.

4.3 Вимоги до обладнання операторів

Під час впровадження оптоволоконної мережі доступу оператор повинен правильно підібрати активне й пасивне обладнання. Від цього залежить не тільки

швидкість підключення, а й стабільність роботи мережі, можливість керування абонентами, підтримка різних сервісів і подальша модернізація інфраструктури.

Основним елементом на стороні оператора є OLT. Він керує PON-сегментом, передає дані до абонентів, приймає трафік від ONT/ONU, підтримує профілі швидкості, VLAN, QoS і службові функції. Для оператора важливо, щоб OLT мав достатню кількість портів, продуктивні uplink-з'єднання та можливість розширення. Якщо мережа будується з перспективою модернізації, бажано використовувати платформу, яка може підтримувати не тільки GPON, а й XGS-PON або інші новіші стандарти [1; 9].

Абонентське обладнання ONT/ONU повинно бути сумісним з OLT і підтримувати потрібні послуги. Для домашніх користувачів це може бути простий термінал з Ethernet або Wi-Fi. Для бізнес-клієнтів важливішими є стабільність, підтримка VLAN, якісна діагностика та можливість роботи з корпоративними сервісами. У мережах GPON і XGS-PON керування абонентськими пристроями виконується через OMCI, тому сумісність ONT з обладнанням оператора має практичне значення [17].

Окремо потрібно враховувати оптичні модулі, сплітери, муфти, кроси та агрегаційне обладнання. Оптичні модулі повинні відповідати стандарту, довжині хвилі, швидкості та оптичному бюджету. Сплітери мають забезпечувати потрібний коефіцієнт розгалуження без перевищення допустимих втрат. Агрегаційні комутатори або маршрутизатори повинні мати достатню пропускну здатність, інакше вузьке місце може виникнути не в PON-сегменті, а на рівні uplink.

Не менш важливими є живлення, резервування та моніторинг. OLT і агрегаційне обладнання повинні мати стабільне живлення, резервні блоки або UPS. Система моніторингу має показувати стан PON-портів, ONT, рівні оптичного сигналу, завантаження, аварії та помилки. Без такого контролю оператору складно швидко знаходити несправності й підтримувати якість послуг.

Основні вимоги до обладнання операторів оптоволоконного доступу наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні вимоги до обладнання операторів оптоволоконного доступу

Компонент	Основні вимоги	Значення для мережі
OLT	Підтримка стандартів PON, продуктивність, uplink, QoS, VLAN	Керує PON-сегментами та сервісами
ONT/ONU	Сумісність з OLT, потрібні інтерфейси, стабільність	Забезпечує підключення абонента
Оптичні модулі	Відповідна швидкість, довжина хвилі, оптичний бюджет	Впливають на якість передавання сигналу
Сплітери та ODN	Низькі втрати, правильне розгалуження, якісний монтаж	Визначають стабільність і модернізацію мережі
Агрегаційне обладнання	Достатні uplink-порти, резервування, VLAN, QoS	З'єднує доступ із транспортною мережею
Система живлення	UPS, акумулятори, резервні блоки	Забезпечує роботу під час аварій
Моніторинг і керування	Контроль портів, ONT, сигналу, аварій	Спрощує експлуатацію та підтримку абонентів
Безпека	Авторизація, розмежування доступу, захист керування	Захищає мережу й абонентські дані

Обладнання оператора потрібно оцінювати комплексно. Недостатньо вибрати тільки дешевий OLT або ONT. Важливо враховувати сумісність, продуктивність, можливість модернізації, резервування живлення, якість ODN і підтримку систем керування. Такий підхід дозволяє побудувати мережу, яка буде стабільною не лише на момент запуску, а й у майбутньому.

4.4 Економічна доцільність: аналіз TCO

Під час вибору технології оптоволоконного доступу оператор повинен оцінювати не тільки технічні характеристики, а й повну вартість володіння мережею. Для цього використовується показник TCO - *Total Cost of Ownership*. Він враховує витрати на будівництво, експлуатацію, ремонт, обслуговування, енергоспоживання та майбутню модернізацію мережі.

TCO складається з двох основних частин: CAPEX і OPEX. CAPEX - це початкові капітальні витрати, до яких належать проєктування, закупівля OLT, ONT/ONU, кабелю, сплітерів, муфт, кросів, оптичних модулів, монтажні роботи та підключення абонентів. OPEX - це експлуатаційні витрати: електроенергія,

ремонт, моніторинг, технічна підтримка, заміна обладнання та виїзди аварійних бригад [6].

Для PON-мереж важливою економічною перевагою є відсутність активного обладнання в розподільчій частині. Пасивні сплітери не потребують електроживлення, тому оператор зменшує витрати на енергію, обслуговування та захист проміжних вузлів. Це особливо важливо при масовому підключенні житлових абонентів, де потрібно зменшити витрати на одного користувача.

Найнижчий поріг входу зазвичай має GPON. Обладнання для цієї технології масове, доступне й добре відпрацьоване. Тому GPON залишається економічно доцільним для побутових абонентів, приватного сектору та базових тарифних планів. XGS-PON має вищу початкову вартість, але дає більший запас швидкості та краще підходить для нових житлових комплексів, бізнес-клієнтів і сервісів із високим висхідним трафіком [9].

Перспективні технології, такі як NG-PON2, 25G-PON, 50G-PON або 25/50G-EPON, мають вищий CAPEX. Їхнє впровадження не завжди виправдане для звичайного домашнього доступу. Такі рішення доцільніше застосовувати там, де є реальний попит на високу пропускну здатність: у бізнес-районах, для мобільного транспорту, відеоспостереження або високонавантажених сегментів мережі.

На TCO сильно впливає якість пасивної інфраструктури. Якщо ODN має низькі втрати, правильне маркування і запас оптичного бюджету, оператор зможе поступово модернізувати мережу без повної заміни кабельної частини. Якщо ж пасивна мережа побудована неякісно, перехід на XGS-PON або 50G-PON буде дорожчим і складнішим.

Основні фактори TCO оптоволоконної мережі доступу наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Основні фактори ТСО оптоволоконної мережі доступу

Фактор	Вплив на економіку мережі
Вартість обладнання	Визначає початкові витрати на запуск мережі
Якість ODN	Впливає на ремонт, стабільність і майбутню модернізацію
Щільність абонентів	Чим вища щільність, тим нижча вартість на одного користувача
Коефіцієнт розгалуження	Впливає на кількість портів OLT і оптичний бюджет
Енергоспоживання	Формує частину експлуатаційних витрат
Аварійність	Збільшує витрати на ремонт і технічну підтримку
Резервне живлення	Підвищує стійкість, але збільшує початкові витрати
Попит на швидкісні тарифи	Визначає можливість окупності новіших технологій

Найкраща технологія з економічного погляду - це не обов'язково найшвидша технологія. Для масового доступу часто достатньо GPON. Для мереж із запасом на майбутнє доцільно розглядати XGS-PON. Для високонавантажених сегментів можуть бути виправдані 25G або 50G-рішення, але лише за наявності реального попиту та якісної ODN.

4.5 Технічні виклики: сумісність зі старою інфраструктурою, інтеграція з мобільними мережами

Під час впровадження оптоволоконної мережі доступу оператор стикається не тільки з економічними, а й з технічними викликами. На практиці мережа рідко будується повністю з нуля. Часто вже існує стара інфраструктура: мідні лінії, FTTB, Ethernet у будинках, кабельна каналізація, опори, старі вузли доступу та різне обладнання. Тому нову оптичну мережу потрібно правильно інтегрувати в уже наявну систему.

Одним із головних викликів є сумісність зі старою інфраструктурою. Якщо оператор переходить від FTTB до FTTH, йому потрібно прокласти волокно не тільки до будинку, а й до квартири або офісу абонента. У старій забудові це може бути складно через зайняті кабельні канали, відсутність нормальних стояків, обмежений доступ до технічних приміщень або поганий стан внутрішньобудинкової інфраструктури. Через це модернізація часто виконується поступово, без одночасної заміни всіх підключень.

Важливим технічним питанням є якість ODN. Пасивна оптична розподільча мережа повинна мати низькі втрати, правильне маркування, якісні зварні з'єднання, захищені муфти та достатній запас оптичного бюджету. Якщо ODN побудована неякісно, мережа може працювати нестабільно навіть при використанні сучасного обладнання. Крім того, слабка пасивна інфраструктура ускладнює майбутній перехід від GPON до XGS-PON або 50G-PON [4].

Ще одним викликом є сумісність активного обладнання. OLT, ONT/ONU, оптичні модулі та система керування повинні коректно працювати між собою. Формальна підтримка одного стандарту не завжди гарантує повну сумісність у реальній мережі, особливо якщо використовуються пристрої різних виробників. Тому перед масовим впровадженням оператору потрібно тестувати обладнання, перевіряти роботу сервісів, профілів швидкості, VLAN, QoS і моніторингу [17].

Окреме значення має енергостійкість. Перевага PON полягає в тому, що між OLT і ONT немає активного обладнання, яке потребує живлення. Проте сам OLT на вузлі оператора та ONT у користувача все одно повинні бути заживлені. Якщо операторський вузол має резервне живлення, а абонент не має живлення для ONT і Wi-Fi-роутера, доступ до інтернету не працюватиме. Тому для стабільної роботи мережі потрібні UPS, акумулятори або інші рішення резервного живлення.

Основні технічні виклики впровадження оптоволоконних мереж доступу наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Основні технічні виклики впровадження оптоволоконних мереж доступу

Технічний виклик	Суть проблеми	Можливий підхід до вирішення
Сумісність зі старою інфраструктурою	Наявність FTTB, Ethernet, мідних або змішаних мереж	Поетапна модернізація та аудит мережі
Якість ODN	Втрати сигналу, погане маркування, слабка документація	Вимірювання, паспортизація, якісний монтаж
Сумісність OLT і ONT/ONU	Різні виробники та профілі керування	Попереднє тестування обладнання
Енергостійкість	Залежність OLT і ONT від живлення	UPS, акумулятори, резервування вузлів
Інтеграція з мобільними мережами	Вимоги до швидкості, затримки й надійності	XGS-PON, 25G-PON, резервування, QoS
Безпека	Ризик несанкціонованого доступу та помилок VLAN	Авторизація, контроль доступу, захист керування
Масштабування	Зростання кількості абонентів і трафіку	Запас волокон, якісна ODN, підтримка нових стандартів

Ще одним напрямом є інтеграція оптоволоконного доступу з мобільними мережами. Сучасні базові станції 4G і 5G потребують швидкого та надійного транспортного підключення. Для таких задач можуть використовуватися XGS-PON, 25G-PON або активні Ethernet-рішення. При цьому важливі не тільки швидкість, а й затримка, стабільність, резервування та синхронізація. Для синхронізації часу в телекомунікаційних мережах може застосовуватися IEEE 1588 PTP [19].

З таблиці видно, що основні технічні проблеми пов'язані не тільки зі стандартом PON, а й з якістю проєктування, монтажу та експлуатації. Навіть сучасна технологія не буде ефективною, якщо мережа має слабку ODN, погане живлення, несумісне обладнання або відсутність нормального моніторингу.

Отже, впровадження оптоволоконної мережі доступу потребує комплексного підходу. Оператор повинен оцінити стан наявної інфраструктури, перевірити ODN, підібрати сумісне обладнання, передбачити резервне живлення, забезпечити безпеку та можливість подальшого масштабування. Тільки в такому випадку мережа буде стабільною, економічно доцільною і готовою до майбутньої модернізації.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розглянуто практичні аспекти впровадження оптоволоконних мереж доступу в міських і сільських регіонах, приклади використання в Україні та Європі, вимоги до операторського обладнання, економічні показники ТСО та технічні виклики інтеграції. Аналіз показав, що успішне розгортання визначається не лише вибором стандарту, а й якістю проєктування, станом кабельної інфраструктури, резервуванням живлення та готовністю мережі до подальшого розширення.

Для міських районів найрезультативнішою є модель із високою щільністю підключень і швидким поверненням інвестицій. Для сільських територій основними обмеженнями залишаються довгі лінії, нижча концентрація абонентів і більша вартість будівництва на одного користувача, тому там потрібне точне планування траси, вузлів розподілу та навантаження на PON-сегменти.

ВИСНОВКИ

У роботі було розглянуто технології побудови оптоволоконних мереж доступу та виконано їх порівняльний аналіз. Основну увагу приділено архітектурам FTTx, пасивним і активним оптичним мережам, стандартам GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, EPON, 10G-EPON, а також перспективним 25G/50G-рішенням.

У першому розділі було показано, що розвиток мереж доступу поступово перейшов від мідних і гібридних технологій до оптоволоконних рішень. Основними причинами цього стали зростання обсягів трафіку, потреба у стабільному високошвидкісному доступі, розвиток хмарних сервісів, відеозв'язку, систем відеоспостереження та інтернету речей. Мідні технології були важливими на ранніх етапах розвитку інтернет-доступу, але вони мають обмеження за дальністю, швидкістю та стійкістю до завад. Оптичне волокно має більший запас пропускної здатності та краще підходить для довгострокового розвитку мережі.

Було встановлено, що архітектури FTTx відрізняються точкою завершення оптичної лінії. Найбільший потенціал має FTTH, оскільки волокно підводиться безпосередньо до абонента. Водночас FTTB, FTTC і FTTO також залишаються актуальними для окремих умов розгортання. Наприклад, FTTB може бути доцільним у багатоквартирних будинках, а FTTO - для офісів і корпоративних клієнтів.

У другому розділі було розглянуто технічні принципи побудови оптоволоконних мереж доступу. Встановлено, що для масового підключення абонентів найчастіше використовується топологія “точка - багато точок”, яка є основою PON-мереж. Така схема дозволяє одному порту OLT обслуговувати групу абонентів через пасивні сплітери. Для корпоративних або спеціальних підключень може застосовуватися топологія “точка - точка”, а для підвищення надійності на рівні агрегації - кільцеві структури.

Порівняння активних і пасивних мереж показало, що PON є більш економічним рішенням для масового FTTH-доступу, оскільки не потребує

активного обладнання в розподільчій частині. Це зменшує експлуатаційні витрати та підвищує стійкість мережі. Активні мережі AON забезпечують кращу керованість окремих підключень, але потребують живлення проміжного обладнання, що збільшує витрати та кількість потенційних точок відмови.

У роботі було розглянуто основні стандарти PON. GPON залишається найпоширенішою технологією для масового доступу завдяки доступності обладнання та достатній швидкості для більшості побутових сервісів [1]. XG-PON забезпечує вищу швидкість у низхідному напрямку, але залишається асиметричним. XGS-PON є більш сучасним рішенням, оскільки підтримує симетричні 10 Гбіт/с і краще підходить для бізнес-клієнтів, хмарних сервісів, відеоспостереження та мобільного транспорту [3].

Окремо було проаналізовано технології Ethernet PON. GE-PON і 10GE-PON базуються на Ethernet-підході, тому добре інтегруються з IP/Ethernet-інфраструктурою операторів. Такі рішення є доцільними для мереж, які історично розвивалися на базі EPON. Подальший розвиток IEEE-напрямку пов'язаний із 25G-EPON і 50G-EPON, які можуть використовуватися у високонавантажених мережах [4].

У третьому розділі було виконано порівняльний аналіз технологій. Встановлено, що GPON є найкращим варіантом для масового домашнього доступу за критерієм вартості. XGS-PON має кращий баланс між швидкістю, симетричністю та перспективністю. NG-PON2 має високий технічний потенціал завдяки використанню кількох довжин хвиль, але є складнішим і дорожчим у впровадженні [9]. 25G/50G-рішення доцільно застосовувати вибірково - у сегментах, де справді потрібна висока пропускна здатність.

Також було визначено основні критерії вибору технології: швидкість, симетричність каналу, дальність, масштабованість, CAPEX, OPEX, енергоспоживання, надійність, резервування, QoS і SLA. Для побутового абонента головними є ціна, стабільність і достатня швидкість. Для бізнесу важливішими є симетричність, гарантії якості, резервування та підтримка QoS. Для мобільної

інфраструктури значення мають також затримка, надійність і можливість подальшого масштабування.

У четвертому розділі було розглянуто практичні аспекти впровадження. У міських регіонах оптоволоконні мережі економічно вигідніші через високу щільність абонентів. Там доцільно використовувати FTTH, FTTB, GPON або XGS-PON залежно від типу забудови та вимог до швидкості. У сільській місцевості головними проблемами є великі відстані, нижча щільність користувачів і вища вартість підключення одного абонента. Тому в таких умовах особливо важливо правильно планувати ODN, розміщення сплітерів і коефіцієнт розгалуження.

Приклади України та Європи показали, що оптоволоконний доступ є основою розвитку сучасних фіксованих мереж. В Україні PON має додаткову практичну перевагу через стійкість під час перебоїв електроживлення, оскільки пасивна розподільча ділянка не потребує живлення [11]. У Європі FTTH/FTTB розглядається як стратегічна інфраструктура для цифрової економіки, дистанційної роботи, освіти, медицини та розвитку нових сервісів [12].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ITU-T Recommendation G.984.1. Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1> (дата звернення: 08.06.2026).
2. ITU-T Recommendation G.984.2. Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2> (дата звернення: 08.06.2026).
3. ITU-T Recommendation G.984.3. Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3> (дата звернення: 08.06.2026).
4. FTTH Council Europe. FTTH Handbook. Edition 9. FTTH Council Europe. URL: <https://www.ftthcouncil.eu/resources/all-publications-and-assets/215/ftth-handbook> (дата звернення: 08.06.2026).
5. Broadband Forum. TR-101 Issue 2: Migration to Ethernet-Based Broadband Aggregation. Broadband Forum. URL: <https://www.broadband-forum.org/technical/download/TR-101.pdf> (дата звернення: 08.06.2026).
6. Broadband Forum. TR-156 Issue 4: Using GPON Access in the context of TR-101. Broadband Forum. URL: <https://www.broadband-forum.org/pdfs/tr-156-4-0-0.pdf> (дата звернення: 08.06.2026).
7. ITU-T Recommendation G.987. 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987> (дата звернення: 08.06.2026).
8. ITU-T Recommendation G.987.2. 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.2> (дата звернення: 08.06.2026).

9. ITU-T Recommendation G.9807.1. 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON). International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1> (дата звернення: 08.06.2026).

10. ITU-T Recommendation G.989.1. 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1> (дата звернення: 08.06.2026).

11. ITU-T Recommendation G.989.2. 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2> (дата звернення: 08.06.2026).

12. ITU-T Recommendation G.9804.1. Higher speed passive optical networks: Requirements. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.1> (дата звернення: 08.06.2026).

13. ITU-T Recommendation G.9804.3. 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.3> (дата звернення: 08.06.2026).

14. IEEE Std 802.3ah-2004. IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks. IEEE Standards Association. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3ah/3179/> (дата звернення: 08.06.2026).

15. IEEE Std 802.3av-2009. Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks. IEEE Standards Association. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3av/4060/> (дата звернення: 08.06.2026).

16. IEEE Std 802.3ca-2020. Physical Layer Specifications and Management Parameters for 25 Gb/s and 50 Gb/s Passive Optical Networks. IEEE Standards Association. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3ca/7440/> (дата звернення: 08.06.2026).

17. ITU-T Recommendation G.988. ONU management and control interface (OMCI) specification. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.988> (дата звернення: 08.06.2026).

18. 25GS-PON MSA Group. 25GS-PON Specification. Version 3.0. 2023. URL: <https://www.25gspon-msa.org/wp-content/uploads/2023/11/25GS-PON-Specification-V3.0.pdf> (дата звернення: 08.06.2026).

19. IEEE Std 1588-2019. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. IEEE Standards Association. URL: <https://standards.ieee.org/standard/1588-2019.html> (дата звернення: 08.06.2026).

20. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652> (дата звернення: 08.06.2026).

21. ITU-T Recommendation G.657. Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable. International Telecommunication Union. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657> (дата звернення: 08.06.2026).

22. FTTH Council Europe. European FTTH/B Market Panorama 2024. FTTH Council Europe. URL: <https://www.ftthcouncil.eu/committees/market-intelligence/2043/european-ftth-b-market-panorama-2024> (дата звернення: 08.06.2026).

23. FTTH Council Europe. FTTH/B in Rural Areas 2024. FTTH Council Europe. URL: <https://www.ftthcouncil.eu/knowledge-centre/all-publications-and-assets/2045/ftth-b-in-rural-areas-2024> (дата звернення: 08.06.2026).

24. НКЕК. Річний звіт НКЕК за 2024 рік. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій. URL: <https://nkek.gov.ua/pro-nkek/zvity-nkek/richnyi-zvit-nkek-za-2024-rik> (дата звернення: 08.06.2026).

25. Міністерство цифрової трансформації України. 5G, розвиток xPON та тисячі базових станцій: як відновлювалась та розвивалась сфера зв'язку у 2024 році. URL: [https://thedigital.gov.ua/news/technologies/5g-rozvitok-xpon-ta-tisyachi-](https://thedigital.gov.ua/news/technologies/5g-rozvitok-xpon-ta-tisyachi)

bazovikh-stantsiy-yak-vidnovlyuvalas-ta-rozvivalas-sfera-zvyazku-u-2024-rotsi (дата
звернення: 08.06.2026).