

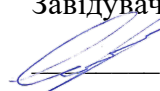
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

«15» 06 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра за освітньою програмою

«Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

на тему: «Побудова мереж доступу на основі технології GPON»

Виконав:

студент III курсу, групи РІ-п31

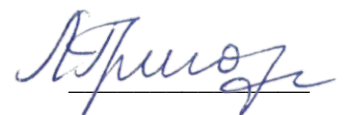
Вовченко Віктор Віталійович



Керівник:

Доцент каф. РІ, к.т.н., доц

Григоренко Олена Григорівна



Рецензент:

Доцент каф. ПРЕ, к.т.н., доцент

Мосійчук Віталій Сергійович

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

Студент 

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЛІТВІНЦЕВ

« 20 » 06 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Вовченку Віктору Віталійовичу

1. Тема роботи «Побудова мереж доступу на основі технології GPON», керівник роботи Григоренко Олена Григорівна, доцент, канд.техн.наук. затверджені наказом по університету від «28» травня 2026р. No1990-с
2. Термін подання студентом роботи 15 червня 2026 року
3. Вихідні дані до роботи технологія побудови мережі – GPON відповідно до стандарту ITU-T G.984; об'єкт підключення – багатоквартирний будинок на 32 квартири (4 поверхи); відстань від вузла оператора до об'єкта – 3 км.
4. Зміст роботи аналіз технологій мереж доступу та їх класифікація; дослідження стандартів та технічних особливостей технології GPON; проектування архітектури GPON для підключення абонентів багатоквартирного будинку; розрахунок оптичного бюджету оптичної лінії GPON; аналіз перспектив розвитку пасивних оптичних мереж.

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

Плакат №1 (слайд) Тема роботи

Плакат №2 (слайд) Мета роботи, об'єкт, предмет та актуальність дослідження

Плакат №3 (слайд) Завдання

Плакат №4 (слайд) Класифікація та порівняння технологій PON

Плакат №5 (слайд) Передача даних: низхідний та висхідний потоки

Плакат №6 (слайд) Архітектура та принцип роботи PON

Плакат №7 (слайд) Особливості технології GPON

Плакат №8 (слайд) Обладнання GPON-мережі

Плакат №9 (слайд) Архітектура мережі (32 абоненти)

Плакат №10 (слайд) Прокладання кабелю та абонентське підключення

Плакат №11 (слайд) Розрахунок оптичного бюджету лінії GPON

Плакат №12 (слайд) Перспективи розвитку оптичних мереж

Плакат №13,14 (слайд) Висновки

6. Дата видачі завдання 20.04.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологій мереж доступу та їх класифікація	20.04.26 – 30.04.26	Виконано
2	Дослідження стандартів та особливостей технології GPON	30.04.26 – 10.05.26	Виконано
3	Проектування архітектури мережі мережі доступу	10.05.26 – 20.05.26	Виконано
4	Розрахунок оптичного бюджету лінії GPON	20.05.26 – 28.05.26	Виконано
5	Аналіз обладнання GPON	28.05.26 – 05.06.26	Виконано
6	Аналіз перспектив розвитку пасивних оптичних мереж та оформлення пояснювальної записки	05.06.26 – 15.06.26	Виконано

Студент



Віктор ВОВЧЕНКО

Керівник



Олена ГРИГОРЕНКО

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота має обсяг 72 сторінки, що включає в себе 12 рисунків, 14 таблиць, перелік посилань 20 джерел.

Об'єкт дослідження – побудова мереж доступу електронних комунікацій.

Предмет дослідження – побудова мереж доступу на основі технології GPON.

Метою роботи є порівняння технологій побудови оптичних мереж доступу, зокрема на основі технології GPON, перспектив їх розвитку, аналіз прикладу побудови мережі багатоквартирного будинку.

У дипломній роботі досліджено технології мереж доступу електронних комунікацій, проведено класифікацію та порівняльний аналіз сучасних технологій мереж доступу за типом середовища передавання, принципом побудови та топологічними особливостями, обґрунтовано доцільність застосування пасивних оптичних мереж як найбільш перспективного рішення для організації широкопasmового доступу.

У роботі розглянуто приклад підключення 32 абонентів багатоквартирного будинку, виконано розрахунок оптичного бюджету лінії, підтверджено достатність запасу потужності системи класу В+.

Зазначені перспективи розвитку пасивних оптичних мереж у напрямку XGS-PON, NG-PON2 та 50G-PON.

Значну увагу приділено аналізу стандартів та особливостей технологій GPON.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: пасивні оптичні мережі, мережі доступу, GPON, оптичний лінійний термінал OLT, оптичний абонентський пристрій ONU, сплітер, оптичне волокно.

ABSTRACT

The thesis is 72 pages long and includes 12 figures, 14 tables, and a bibliography of 20 sources.

The object of the study is the construction of electronic communications access networks.

The subject of the study is the construction of access networks based on GPON technology.

The aim of the thesis is to compare technologies for building optical access networks, particularly those based on GPON technology, assess their development prospects, and analyze an example of network construction for an apartment building. The thesis investigates electronic communications access network technologies, classifies and conducts a comparative analysis of modern access network technologies by transmission medium type, construction principle, and topological features, and justifies the feasibility of using passive optical networks as the most promising solution for organizing broadband access.

The thesis examines an example of connecting 32 subscribers in an apartment building, calculates the optical budget of the line, and confirms the adequacy of the power reserve for a Class B+ system. The prospects for the development of passive optical networks in the direction of XGS-PON, NG-PON2, and 50G-PON are outlined. Significant attention is devoted to the analysis of standards and the characteristics of GPON technologies.

KEYWORDS: passive optical networks, access networks, GPON, optical line terminal (OLT), optical network unit (ONU), splitter, optical fiber.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ МЕРЕЖ ДОСТУПУ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ.....	11
1.1 Особливості мереж доступу	11
1.2 Класифікація мереж доступу та їх основні характеристики.....	12
1.2.1. Класифікація за типом середовища передавання	15
1.2.2. Класифікація за принципом побудови мережі з використанням активного обладнання.....	18
1.2.3 Класифікація за топологією мережі	19
1.2.4 Основні характеристики мереж доступу.....	21
1.3 Технологія пасивних оптичних мереж та принцип побудови архітектури	22
1.4 Тенденції розвитку мереж доступу в Україні та світі	27
1.5 Висновки до першого розділу	28
РОЗДІЛ 2. СТАНДАРТИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ GPON.....	30
2.1 Стандарти побудови пасивних оптичних мереж.....	30
2.2 Особливості технології GPON.....	34
2.3 Обладнання, що підтримує технологію GPON.....	41
2.4 Висновки до другого розділу.....	46
РОЗДІЛ 3. ПРИКЛАД ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ GPON	47
3.1 Архітектура мережі доступу та спосіб підключення абонентів	47
3.2 Розрахунок оптичного бюджету оптичної лінії GPON	53
3.3 Перспективи розвитку пасивних оптичних мереж.....	62
3.4 Висновки до третього розділу	67
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ВСТУП

Актуальність роботи визначається сучасним розвитком інформаційного суспільства, що характеризується стрімким зростанням обсягів даних, які потребують великої смуги пропускання мереж передавання. Широке впровадження хмарних обчислень, стримінгових платформ, систем відеоспостереження та Інтернету речей формує постійно зростаючий попит на високошвидкісні канали зв'язку з мінімальними затримками та високою відмовостійкістю. Традиційні рішення на основі мідних кабелів вичерпали свій потенціал щодо забезпечення необхідної пропускної здатності та якості послуг. Волоконно-оптичні технології, завдяки значно меншому загасанню сигналу, широкій смузі пропускання та стійкості до електромагнітних завад, є на сьогодні єдиною практичною альтернативою для побудови сучасної широкосмугової інфраструктури. Разом з тим їх впровадження потребує врахування питань сумісності з наявними мережевими рішеннями.

Об'єкт дослідження – побудова мереж доступу електронних комунікацій.

Предмет дослідження – побудова мереж доступу на основі технології GPON.

Метою роботи є порівняння технологій побудови оптичних мереж доступу, зокрема на основі технології GPON, перспектив їх розвитку, аналіз прикладу побудови мережі багатоквартирного будинку.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані такі основні завдання:

- 1) провести аналіз та класифікацію сучасних технологій мереж доступу електронних комунікацій;
- 2) дослідити стандарти та технічні особливості технології GPON;
- 3) розглянути приклад архітектури мережі доступу на основі технології GPON для підключення 32 абонентів багатоквартирного будинку;
- 4) виконати розрахунок оптичного бюджету оптичної лінії GPON;

- 5) розглянути призначення та параметри обладнання технології GPON;
- 6) проаналізувати перспективи розвитку пасивних оптичних мереж у напрямку XGS-PON, NG-PON2 та 50G-PON.

Запропонований підхід спрямований на створення ефективної та масштабованої мережевої інфраструктури широкосмугового доступу на основі пасивної оптичної технології GPON, яка може значно покращити якість телекомунікаційних послуг для абонентів багатоквартирних будинків та забезпечити довгострокову захищеність капітальних інвестицій оператора завдяки сумісності з наступними поколіннями пасивних оптичних мереж.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- PON – Passive optical network (пасивна оптична мережа)
- GPON – Gigabit PON (гігабітна пасивна оптична мережа)
- EPON – Ethernet PON (пасивна оптична мережа на основі Ethernet)
- BPON – Broadband PON (широкосмугова пасивна оптична мережа)
- APON – ATM Passive Optical Network (пасивна оптична мережа на основі ATM)
- ATM – Asynchronous Transfer Mode (асинхронний режим передавання)
- GEM – GPON Encapsulation Method (метод інкапсуляції GPON)
- OLT – Optical Line Terminal (оптичний лінійний термінал)
- ONU – Optical Network Unit (оптичний мережевий блок)
- ONT – Optical Network Terminal (оптичний мережевий термінал)
- GFP – Generic Framing Procedure (універсальна процедура фреймінгу)
- TDMA – Time Division Multiple Access (множинний доступ з часовим поділом)
- OAM – Operations Administration and Maintenance (експлуатація, адміністрування та обслуговування)
- TLV – Type Length Value (тип-довжина-значення)
- SOP – Start Of Packet (початок пакета)
- LLID – Logical Link Identifier (логічний ідентифікатор каналу)
- GTC – GPON Transmission Convergence (рівень конвергенції передачі GPON)
- PCBd – Physical Control Block downstream (блок фізичного керування низхідного потоку)
- Psync – Physical Synchronization (фізична синхронізація)
- PLOAM – Physical Layer Operations, Administration and Maintenance (керування, адміністрування та обслуговування фізичного рівня)
- BIP – Bit Interleaved Parity (побітова чергова парність)
- BWmap – Bandwidth Map (карта розподілу пропускної здатності)

T-CONT – Transmission Container (контейнер передавання)

DBA – Dynamic Bandwidth Allocation (динамічний розподіл пропускної здатності)

QoS – Quality of Service (якість обслуговування)

OMCI – ONT Management and Control Interface (інтерфейс управління та контролю ONT)

RTT – Round Trip Time (час подвійного проходження сигналу)

EqD – Equalization Delay (вирівнююча затримка)

AES – Advanced Encryption Standard (стандарт розширеного шифрування)

MPCP – Multi-Point Control Protocol (протокол управління багатоточковим обміном)

ODN – Optical Distribution Network (оптична розподільча мережа)

CPE – Customer Premises Equipment (абонентське обладнання)

ISP – Internet Service Provider (інтернет-провайдер)

FDH – Fiber Distribution Hub (оптичний розподільчий вузол)

PLC – Planar Lightwave Circuit (планарна світлохвильова схема)

FOSC – Fiber Optic Splice Closure (муфта оптичного зварювання)

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ МЕРЕЖ ДОСТУПУ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ

1.1 Особливості мереж доступу

Електронні комунікаційні мережі являють собою складні системи, що формуються з сукупності взаємопов'язаних компонентів, кожен із яких виконує визначену функцію у процесі надання послуг користувачам. Базовими елементами такої інфраструктури є мережа доступу та транспортна мережа, які відрізняються за своїм функціональним призначенням, архітектурною побудовою та технічними характеристиками. Мережа доступу виступає складовою електронної комунікаційної системи, що забезпечує фізичне і логічне підключення кінцевих користувачів до мережевої інфраструктури оператора. Згідно з положеннями Закону України «Про електронні комунікації» [1], саме цей сегмент створює умови для надання відповідних послуг, реалізуючи з'єднання між абонентським обладнанням і вузлом мережі оператора. Основна функція мережі доступу полягає у передачі трафіку від користувача до точки агрегації, а також у підтриманні необхідного рівня якості обслуговування, включаючи такі параметри, як пропускна здатність, затримка сигналу та надійність з'єднання. У межах цього сегмента застосовуються різноманітні технології, зокрема xPON, xDSL, FTTx, бездротові рішення та інші. Транспортна мережа, своєю чергою, призначена для передавання значних обсягів інформації між ключовими вузлами електронної комунікаційної системи на великих відстанях. Вона забезпечує взаємодію між мережами доступу, центрами обробки даних, сервісними платформами, а також зовнішніми мережами, включно з глобальною мережею Інтернет. Відповідно до вимог чинного законодавства, транспортна мережа повинна характеризуватися високою пропускною здатністю, масштабованістю та підвищеним рівнем надійності, оскільки її ефективне функціонування безпосередньо впливає на стабільність роботи всієї мережевої інфраструктури оператора. Відмінною рисою мережі доступу є її орієнтація на масове

підключення абонентів із використанням порівняно коротких ліній зв'язку. Натомість транспортна мережа виконує функції агрегування та транзиту трафіку між вузловими елементами, забезпечуючи його передавання на значні географічні відстані. При цьому мережі доступу, як правило, мають більш розгалужену топологію та значно більшу кількість з'єднань, тоді як транспортні мережі оптимізуються шляхом використання високошвидкісних оптичних каналів і впровадження механізмів резервування маршрутів. Таким чином, обидва типи мереж утворюють єдину інтегровану систему, у межах якої вони виконують взаємодоповнювальні функції, забезпечуючи передачу даних від кінцевих користувачів до глобальних інформаційних ресурсів. У процесі проєктування та модернізації електронних комунікаційних мереж особлива увага приділяється забезпеченню доступності послуг, дотриманню принципів технологічної нейтральності, а також ефективному використанню ресурсів мережевої інфраструктури. Вибір технологічних рішень значною мірою визначається характеристиками мережі доступу, оскільки саме вона безпосередньо взаємодіє з абонентським сегментом і впливає на якість наданих послуг. У свою чергу, транспортна мережа забезпечує передачу та консолідацію трафіку між вузлами, гарантуючи виконання вимог щодо надійності, пропускну здатності та безперервності функціонування.

1.2 Класифікація мереж доступу та їх основні характеристики

Мережі доступу електронних комунікацій призначені для забезпечення підключення кінцевих користувачів до інфраструктури оператора, створюючи технічну основу для надання широкого спектра телекомунікаційних послуг. Їх класифікація може здійснюватися за низкою ознак, зокрема за типом середовища передачі даних, використовуваними технологіями та архітектурними принципами побудови.

Основні технології пасивних оптичних мереж з стандартами представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технології пасивних оптичних мереж [4]

Назва технології	Стандарт
Gigabit PON (GPON)	ITU-T G.984.x
Ethernet PON (EPON)	IEEE 802.3ah/ IEEE 802.3av
Broadband PON (BRON)	ITU-T G.983.x
ATM PON (APON)	ITU-T G.983.x

Історично першими технологіями мереж доступу були рішення на основі мідних кабелів – зокрема, аналогові телефонні лінії (POTS) та технології сімейства xDSL, які використовували існуючу абонентську телефонну інфраструктуру для передачі цифрових даних. Технологія ADSL, що набула масового поширення на початку 2000-х років, забезпечувала асиметричну швидкість передачі – до 8 Мбіт/с у напрямку до абонента та до 1 Мбіт/с у зворотному напрямку – при використанні звичайної витієї пари. Пізніші стандарти VDSL та VDSL2 дозволили підвищити швидкість до 100 Мбіт/с, проте лише на коротких відстанях до 300–500 м від вузла оператора. Принципове обмеження мідних технологій – залежність пропускної здатності від довжини лінії та схильність до електромагнітних завад – стало головним стимулом для переходу до оптичних середовищ передавання. Розвиток пасивних оптичних мереж розпочався у 90-х роках минулого століття з появою технології APON. Вона працювала на основі протоколу АТМ і передавала дані у вигляді фіксованих комірок, які містили як службову, так і корисну інформацію. Такий підхід забезпечував ефективну передачу різноманітного трафіку. APON підтримувала як симетричний, так і асиметричний режими роботи [5]. У симетричному режимі швидкість передачі даних була однаковою в обидва боки, тоді як в асиметричному швидкість від оператора до абонента сягала 622 Мбіт/с, а у зворотному напрямку – лише 155 Мбіт/с.

Згодом APON втратила актуальність через обмежену ефективність, і на зміну їй прийшла технологія BPON. BPON забезпечила збільшення швидкості передачі даних та впровадила підтримку концепції Triple Play – одночасну

передачу відео, голосу та даних. Для передачі відеосигналу почали використовувати довжину хвилі 1550 нм, а також реалізували механізми динамічного розподілу пропускної здатності між абонентами.

Подальший розвиток мереж доступу призвів до створення технології EPON, яка базується на Ethernet-протоколах. Вона набула широкого поширення завдяки простоті інтеграції з IP-мережами, зниженій вартості впровадження та можливості передавати дані на відстань до 20 км. EPON використовує різні довжини хвиль для прямого та зворотного каналів зв'язку – 1490 нм і 1310 нм відповідно, а також підтримує відеосервіси. Наступним кроком в еволюції стала технологія GPON, яка значно підвищила ефективність використання пропускної здатності та забезпечила підтримку мультисервісного трафіку. Вона застосовує метод інкапсуляції GEM, що дозволяє передавати різні типи даних – IP, відео, голос – у межах єдиної інфраструктури. GPON забезпечує швидкість передачі до 2,5 Гбіт/с у напрямку до абонента та понад 1 Гбіт/с у зворотному напрямку. Крім того, технологія підтримує підключення великої кількості користувачів на значних відстанях. Водночас впровадження GPON пов'язане з відносно високими витратами на обладнання, що є певним обмежувальним фактором.

В таблиці 1.2 представлено розширену порівняльну характеристику основних технологій пасивних оптичних мереж із урахуванням їх технічних параметрів, функціональних можливостей та експлуатаційних особливостей.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика технологій PON [5, 6]

Параметр	APON	BPON	EPON (GEPON)	GPON
Стандарт	ITU-T G.983.1	ITU-T G.983.3	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984
Протокол	ATM	ATM	Ethernet (IP)	GFP (на базі SDH)
Максимальна швидкість, Мбіт/с	155	622	1000 (1 Гбіт/с)	1244 (1.25 Гбіт/с)

Переваги	Перший стандарт PON	Підтримка Triple Play	Низька вартість, простота інтеграції з IP	Мультипротокольність
Недоліки	Низька швидкість; значні витрати АТМ-комірок; застарілість.	Обмежена смуга пропускання; висока вартість	Менша ефективність смуги; обмежені можливості QoS для критичного трафіку.	Висока вартість і складність

1.2.1. Класифікація за типом середовища передавання

Одна з базових класифікацій мереж доступу в телекомунікаційній галузі – це поділ за типом середовища передавання. Це важливо, адже саме фізичне середовище визначає ключові характеристики передавання даних: пропускну здатність каналу, затримки, завадостійкість, надійність роботи, а також те, скільки коштуватиме побудова та експлуатація мережі. За типом середовища передачі мережі доступу діляться на дротові й бездротові – кожен тип має свої особливості, сильні сторони та обмеження. Дротові мережі доступу працюють через фізичні кабелі – мідні або волоконно-оптичні. Серед найпоширеніших технологій тут можна назвати xDSL, DOCSIS, а також сучасні оптичні рішення на зразок FTTx і xPON. Технології сімейства xDSL дають можливість використовувати наявну телефонну інфраструктуру для передачі даних, що робить їх впровадження економічно вигідним. Але є й недоліки – серйозні обмеження за швидкістю передачі та дальністю зв'язку [6].

Кабельні мережі DOCSIS, які працюють на коаксіальних кабелях, забезпечують вищу пропускну здатність порівняно з xDSL.

Однак тут є проблема: оскільки середовище передачі спільне для багатьох користувачів, при зростанні навантаження якість обслуговування погіршується. Найбільш прогресивними на сьогодні вважаються волоконно-

оптичні мережі, які будуються за концепціями FTTx та PON. Їхні переваги очевидні: висока пропускна здатність, мінімальні втрати сигналу, повна відсутність впливу електромагнітних завад та великий потенціал для масштабування.

Саме через ці якості оптичні технології домінують у сучасних телекомунікаційних системах і залишаються найперспективнішими на майбутнє. Бездротові мережі доступу передають інформацію через радіоканал. До них належать технології 4G (LTE), 5G, фіксований бездротовий доступ та радіорелейні системи. Основні плюси таких мереж – швидке розгортання, відсутність необхідності прокладати кабелі та можливість підтримувати мобільність користувачів. Проте є й суттєві мінуси: бездротові мережі сильно залежать від доступності радіочастотного спектра, рівня перешкод та умов поширення радіохвиль. Усе це може впливати на стабільність з'єднання та швидкість передачі даних.

У таблиці 1.3 наведено порівняння дротових і бездротових мереж доступу з урахуванням їх експлуатаційних та економічних показників.

Таблиця 1.3 – Характеристика дротових та бездротових мереж доступу [7, 8]

Характеристика	Дротові мережі доступу	Бездротові мережі доступу
Тип середовища передачі	Фізичні канали зв'язку на основі мідних або волоконно-оптичних кабелів, що забезпечують керовану передачу сигналу	Електромагнітні хвилі радіодіапазону, що поширюються у відкритому середовищі
Ключові технології	xDSL, DOCSIS, FTTx, xPON	4G (LTE), 5G, FWA, радіорелейні системи
Пропускна здатність	Від десятків Мбіт/с (xDSL) до декількох Гбіт/с і більше (оптичні мережі) зі стабільними параметрами	Від десятків Мбіт/с до декількох Гбіт/с залежно від стандарту, спектра та щільності абонентів
Надійність з'єднання	Висока, стабільна, практично не залежить від	Варіативна, залежить від рівня завад, погодних умов та

	зовнішніх природних факторів	особливостей середовища
Дистанція передачі	Обмежується характеристиками кабелю та активного обладнання; для оптики – десятки кілометрів	Визначається радіусом покриття базових станцій і умовами поширення сигналу
Можливість масштабування	В оптоволоконних мережах має великий вплив	Обмежена доступним радіочастотним ресурсом
Складність у проектуванні	Висока, потребує детального планування та прокладання кабельної інфраструктури	Відносно нижча, однак вимагає радіопланування та оптимізації покриття

Як видно з наведених даних, дротові мережі, особливо на базі оптичних технологій, забезпечують більш стабільні показники якості обслуговування та значно вищу пропускну здатність. Водночас бездротові рішення є більш гнучкими з точки зору розгортання та дозволяють оперативно забезпечити доступ до мережі в умовах відсутності розвиненої кабельної інфраструктури.

В таблиці 1.4 представлено деталізоване порівняння основних технологій дротових мереж доступу з урахуванням їх технічних можливостей, обмежень та особливостей практичного застосування.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика дротових мереж доступу [9]

Технологія	Середовище передачі	Максимальна швидкість передачі	Масштабованість	Особливості
xDSL	Мідні телефонні лінії	До 100 Мбіт/с (залежно від стандарту та довжини лінії)	Низька через фізичні обмеження середовища	Використання наявної інфраструктури, обмежений радіус дії та пропускну здатність
DOCSIS	Коаксіальний кабель у складі мереж	До 1 Гбіт/с і більше (залежно від	Середня, обмежена спільним	Спільне використання каналу між абонентами,

	кабельного телебачення	версії стандарту)	доступом до ресурсу	ефективність залежить від навантаження
PON (GPON, EPON)	Волоконно-оптичний кабель із використанням пасивних розгалужувачів	Від 1 до кількох Гбіт/с	Висока, з можливістю нарощування пропускної здатності	Пасивна архітектура, висока надійність, ефективне використання оптичного ресурсу

Проведений аналіз демонструє, що найбільш перспективними з точки зору довгострокового розвитку є оптичні технології, зокрема мережі PON, які забезпечують оптимальне поєднання продуктивності, надійності та масштабованості. Водночас технології на базі мідних середовищ залишаються актуальними у випадках, коли необхідно мінімізувати витрати на модернізацію або використати вже наявну інфраструктуру.

1.2.2. Класифікація за принципом побудови мережі з використанням активного обладнання

Мережі доступу також класифікують за принципом побудови – це визначає, як саме передаються дані, яке обладнання задіяне і наскільки ефективно функціонує система загалом. За цією ознакою виділяють два типи: активні та пасивні мережі доступу. В активних мережах між обладнанням оператора і кінцевим користувачем розміщені активні телекомунікаційні пристрої – комутатори, підсилювачі, маршрутизатори. Це дає змогу гнучко керувати трафіком, забезпечувати якість обслуговування (QoS) і налаштовувати маршрутизацію окремо для кожного клієнта. Разом із тим такий підхід має свої мінуси: кожен проміжний вузол потребує електроживлення, що ускладнює обслуговування та підвищує операційні

витрати. Крім того, велика кількість активних пристроїв закономірно підвищує ризик відмов через несправності обладнання.

Пасивні мережі побудовані за іншим принципом. У розподільній частині тут використовуються компоненти, які не потребують живлення, – зокрема оптичні сплітери. Найпоширенішим прикладом є пасивні оптичні мережі (PON), що реалізують топологію «точка–багатоточка»: один оптичний лінійний термінал (OLT) на стороні оператора обслуговує групу абонентських терміналів (ONU/ONT) через пасивну оптичну інфраструктуру.

Серед ключових переваг пасивних мереж – нижчі витрати на експлуатацію, простіша інфраструктура та краща надійність, оскільки в розподільному сегменті відсутні активні елементи, які могли б вийти з ладу.

Додатково варто відзначити раціональне використання оптичного ресурсу та широкі можливості для масштабування мережі.

1.2.3 Класифікація за топологією мережі

З точки зору топологічної організації мережі доступу поділяються на структури типу «точка–точка», «точка–багатоточка» та коміркові (сотові) моделі. Вибір конкретної топології безпосередньо впливає на вартість побудови мережі, її продуктивність, надійність та можливості подальшого розширення. Топологія «точка–точка» передбачає встановлення індивідуального каналу зв'язку між вузлом оператора та кожним окремим абонентом. У такій мережі кожен користувач отримує виділений ресурс, що забезпечує стабільно високу швидкість передачі даних і мінімальні затримки. Разом із тим, реалізація цієї топології потребує значних витрат на прокладання кабелів і встановлення активного обладнання, що обмежує її застосування переважно корпоративним сегментом. Топологія «точка–багатоточка» базується на принципі спільного використання одного фізичного каналу групою абонентів. У таких мережах сигнал від центрального вузла розподіляється за допомогою пасивних розгалужувачів (спліттерів).

Саме ця топологія використовується в технологіях сімейства PON, зокрема GPON, і дозволяє значно зменшити витрати на інфраструктуру при збереженні достатньо високої якості обслуговування. Коміркова (сотова) топологія характерна для бездротових мереж доступу.

У цьому випадку зона покриття поділяється на окремі комірки, кожна з яких обслуговується базовою станцією.

В таблиці 1.5 представлена характеристика топологій мереж.

Таблиця 1.5 – Порівняльна характеристика топологій мереж доступу [10]

Тип топології	Принцип організації з'єднання	Технічні особливості реалізації	Типові сфери застосування
Точка–точка (P2P)	Кожен абонент підключається до вузла оператора через окремий фізичний канал	Використовується індивідуальне волокно або канал;	Корпоративні мережі, банки, дата-центри
Точка–багатоточка (P2MP)	Один канал зв'язку використовується групою абонентів через розгалуження сигналу	Застосовуються пасивні спліттери; передача організована за принципом часового поділу; централізоване управління	GPON, EPON, FTTH мережі
Коміркова (сотова)	Територія поділяється на зони, кожна з яких обслуговується базовою станцією	Використання радіоканалів; необхідність частотного планування; підтримка роумінгу між комірками	Мобільні мережі, бездротовий доступ

Таким чином, для побудови сучасних мереж доступу найбільш доцільною є топологія «точка–багатоточка», яка використовується в технології GPON.

1.2.4 Основні характеристики мереж доступу

Ефективність функціонування мережі доступу визначається сукупністю технічних та експлуатаційних характеристик, які безпосередньо впливають на якість надання послуг кінцевим користувачам. При проєктуванні сучасних телекомунікаційних систем, зокрема мереж на основі технології GPON, необхідно враховувати ці параметри комплексно, оскільки вони є взаємопов'язаними і впливають один на одного. Однією з ключових характеристик є пропускна здатність, яка визначає максимальний обсяг даних, що може передаватися мережею за одиницю часу. Цей параметр є критично важливим у контексті стрімкого зростання обсягів трафіку, пов'язаного з використанням відеосервісів високої якості, онлайн-ігор, хмарних технологій та інших ресурсоємних застосунків. У мережах GPON пропускна здатність розподіляється між абонентами, підключеними до одного оптичного порту, що вимагає ефективного управління трафіком і врахування пікових навантажень. Не менш важливою є дальність передавання сигналу, яка визначає максимально допустиму відстань між центральним вузлом мережі (OLT) та абонентським обладнанням (ONU або ONT). Даний параметр залежить від характеристик оптичного волокна, рівня затухання сигналу, кількості з'єднань та використаних пасивних компонентів. У практичних умовах при проєктуванні GPON-мереж обов'язково виконується розрахунок оптичного бюджету, що дозволяє забезпечити стабільну роботу мережі на заданій відстані. Надійність мережі характеризує її здатність забезпечувати безперервне функціонування та мінімальну кількість відмов [11].

В умовах сучасних вимог до якості обслуговування цей параметр має особливе значення, оскільки навіть короточасні збої можуть призводити до суттєвих незручностей для користувачів. Технологія GPON має перевагу в цьому аспекті завдяки використанню пасивних елементів у розподільчій мережі, що знижує ймовірність виходу з ладу обладнання. Разом з тим, для підвищення надійності часто застосовуються різні методи резервування.

Масштабованість є важливою характеристикою, яка визначає можливість поступового розширення мережі без необхідності значних змін у її структурі.

У контексті GPON це означає можливість підключення нових абонентів шляхом використання додаткових спліттерів або портів OLT.

Ще одним важливим параметром є затримка передачі даних (latency), яка визначає час проходження сигналу від джерела до приймача. Цей показник має критичне значення для сервісів реального часу, таких як відеоконференції, IP-телефонія або онлайн-ігри. У мережах GPON затримка зазвичай є невеликою, проте вона може збільшуватися при високому рівні завантаження мережі або неефективному розподілі ресурсів. Окрім технічних характеристик, важливу роль відіграє економічна ефективність мережі доступу. Вона визначається співвідношенням витрат на побудову та експлуатацію мережі до отриманого ефекту. Технологія GPON дозволяє значно знизити витрати за рахунок спільного використання оптичного волокна кількома абонентами.

1.3 Технологія пасивних оптичних мереж та принцип побудови архітектури

Архітектура пасивних оптичних мереж нагадує деревоподібну структуру, де по волоконно-кабельній інфраструктурі сигнал розподіляється через пасивні оптичні розгалужувачі – так звані сплітери. Ці пристрої розташовані у вузлових точках розподільної мережі і не потребують електроживлення. Завдяки такій будові вдається побудувати систему широкосмугового доступу, яка обходиться відносно недорого і при цьому легко розширюється під зростаючі потреби абонентів. Суть роботи PON у тому, що один оптичний лінійний термінал на боці оператора обслуговує відразу багато абонентських пристроїв. Сигнал йде через пасивні компоненти, тому між оператором і користувачем не треба ставити жодного активного обладнання, яке б вимагало живлення чи обслуговування. Типова схема PON включає центральний вузол оператора (OLT), оптичні сплітери, що

розподіляють сигнал, та абонентські термінали (ONU/ONT), розташовані у кінцевих користувачів. Розвиток технологій PON став відповіддю на зростаючі вимоги до швидкості та якості передавання даних, підвищення надійності телекомунікаційних послуг і необхідність зменшення залежності від електроживлення проміжного обладнання [12].

Особливої актуальності ця технологія набула в умовах зростання навантаження на мережі через активне використання високошвидкісного контенту, зокрема потокового відео у форматах 4K та 8K, а також потреби у модернізації застарілих мідних інфраструктур.

Окремим фактором є підвищені вимоги до стійкості зв'язку в умовах можливих перебоїв електропостачання.

На рисунку 1.1 представлена архітектура мережі PON.

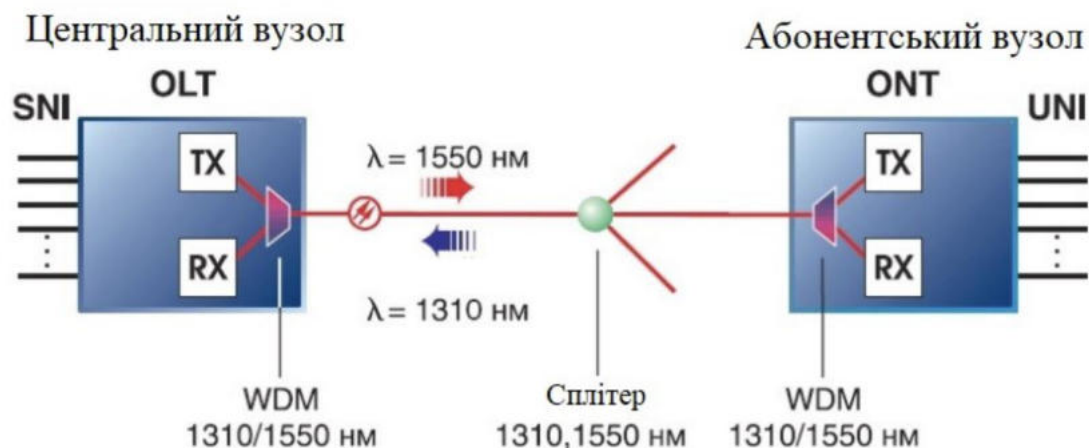


Рисунок 1.1 – Архітектура й основні елементи мережі PON [13]

Головним елементом пасивної оптичної мережі виступає оптичний лінійний термінал (OLT), який встановлюють у центральному вузлі оператора зв'язку. Він приймає дані з магістральних мереж через сервісні інтерфейси (SNI) і формує низхідний потік даних (downstream), що йде по деревоподібній структурі PON до абонентів. На протилежному кінці мережі розміщується оптичний мережний термінал (ONT) – його ставлять безпосередньо у користувача. ONT підключає кінцеве обладнання через інтерфейси UNI (User Network Interfaces) і водночас взаємодіє з PON-деревом. Коли ONT отримує

сигнал від OLT, він його декодує та перетворює у формат, зручний для передачі на абонентські пристрої. Передача сигналів у PON організована з використанням різних довжин хвиль: висхідний напрямок (uplink) зазвичай працює на 1310 нм, а низхідний потік (downlink) йде на 1550 нм. Таке розділення дозволяє ефективніше використовувати оптичне середовище [14].

Важливу роль у розподільній інфраструктурі відіграє оптичний розгалужувач – це пасивний багатопортовий пристрій, який розподіляє оптичний сигнал в одну сторону і об'єднує кілька сигналів у зворотну. Загалом він може мати будь-яку конфігурацію з M входами та N виходами, де кількість виходів відповідає числу абонентських підключень. На практиці у PON найчастіше використовують одновхідні розгалужувачі типу 1:N. Конфігурації 2:N застосовують рідше – переважно у схемах з резервуванням волокон для вищої надійності. І в OLT, і в ONT вбудовані WDM-мультиплексори, які розділяють та об'єднують висхідні й низхідні оптичні потоки в межах одного волокна. Ці компоненти мають низькі втрати сигналу і не потребують температурної стабілізації, що суттєво спрощує експлуатацію мережі.

Низхідний потік у PON організований за принципом широкомовної передачі: OLT надсилає єдиний потік даних, який фізично досягає всіх ONT у мережі. Кожен ONT аналізує ідентифікатори GEM-портів у заголовках кадрів і обробляє лише ті з них, що призначені саме йому, ігноруючи трафік інших абонентів. У висхідному напрямку всі ONT використовують спільне оптичне середовище та однакову довжину хвилі 1310 нм, тому одночасна передача від кількох пристроїв призвела б до накладання сигналів і втрати даних. Для усунення цього конфлікту OLT централізовано керує доступом до каналу за допомогою механізму TDMA: кожному ONT виділяється строго визначений часовий інтервал для передачі, поза межами якого пристрій утримується від передачі. Оскільки ONT розташовані на різних відстанях від OLT і мають різні затримки поширення сигналу, OLT вимірює час подвійного проходження RTT для кожного пристрою та обчислює індивідуальну вирівнювальну затримку

EqD, яка компенсує різницю у відстанях і забезпечує надходження сигналів від усіх абонентів у суворій черговості без перекриття.

Кожному ONT виділяється свій індивідуальний часовий слот для передачі, причому враховується компенсація затримок – адже різні абоненти знаходяться на різній відстані від центрального вузла OLT. Така система дозволяє забезпечити стабільну роботу всієї мережі. Серед основних переваг технології PON варто відзначити її енергонезалежність, оскільки проміжні вузли не потребують живлення, що дозволяє підтримувати роботу мережі навіть у разі відсутності електроенергії за умови функціонування обладнання на стороні оператора та абонентського термінала. Архітектура «точка–багатоточка» забезпечує зручність масштабування мережі та її розширення без суттєвих змін у базовій інфраструктурі, що особливо ефективно для приватного сектору та нових забудов. Крім того, використання оптичного волокна забезпечує високу якість сигналу, стійкість до електромагнітних завад і стабільність з'єднання у порівнянні з мідними рішеннями.

Додатковою перевагою є економічна ефективність, яка досягається завдяки відсутності активного обладнання в розподільній частині мережі, що зменшує витрати на обслуговування та експлуатацію. Водночас технологія PON має і певні недоліки, серед яких варто виділити обмеження щодо дальності та коефіцієнта розгалуження, що може впливати на якість послуг при великій кількості абонентів у сегменті. На рисунку 1.2 представлена схема передачі даних у PON для низхідного та висхідного напрямків трафіку.

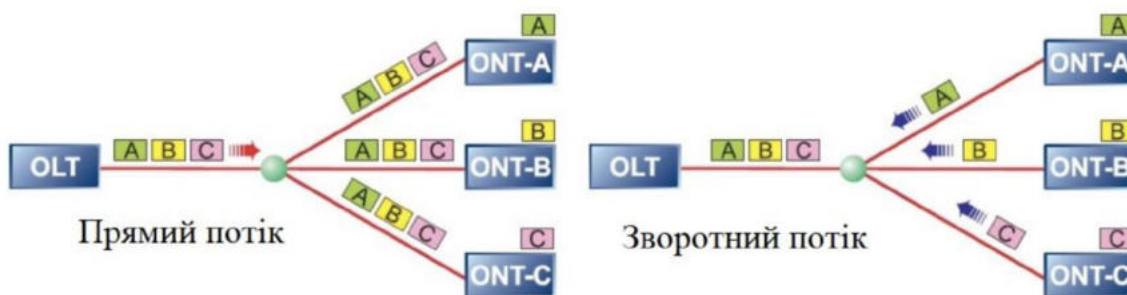


Рисунок 1.2 – Структура організації передачі даних у PON для низхідного та висхідного напрямків трафіку [15]

У PON-мережах розподіл часових інтервалів на стороні OLT реалізується за допомогою протоколу MPCP (Multi-Point Control Protocol), який входить до стандарту IEEE 802.3ah. Його робота базується на двох службових Ethernet-повідомленнях – GATE і REPORT. Повідомлення GATE надсилається від OLT до ONU і визначає, у який саме момент та в якому часовому інтервалі абоненту дозволено передавати дані у зворотному напрямку. У свою чергу, REPORT формується на стороні ONU і передається до OLT. У ньому міститься інформація про стан абонентського пристрою, зокрема про заповнення буферів та поточне навантаження. Завдяки цьому OLT може більш гнучко планувати розподіл ресурсів між усіма користувачами. Обидва типи повідомлень реалізуються як керуючі MAC-кадри з EtherType 0x8808. Після завершення етапу налаштування мережа PON переходить у циклічний режим роботи, де кожен елемент виконує свою функцію. ONU постійно перебуває в режимі прийому та відстежує стан оптичного каналу. OLT, зі свого боку, отримує трафік із магістральної мережі у форматі IEEE 802.3, виконує його перетворення у формат IEEE P802.3ah і передає відповідні кадри конкретному ONU. Хоча сигнал приймають усі абонентські вузли, обробляє його лише той, для якого він призначений. На стороні ONU отримані дані знову конвертуються у стандарт IEEE 802.3 і передаються кінцевому обладнанню користувача. У зворотному напрямку ONU накопичує пакети в буфері, перетворює їх у формат PON і очікує дозволу від OLT. Коли виділяється часовий інтервал, пристрій передає накопичені дані в мережу.

У цей час OLT приймає дані від абонентів, конвертує їх у IEEE 802.3 і передає далі у вищі рівні мережі. Таким чином забезпечується безперервний двонаправлений обмін даними в архітектурі PON.

1.4 Тенденції розвитку мереж доступу в Україні та світі

Протягом останнього десятиліття у світовій телекомунікаційній галузі спостерігається стійка тенденція до переходу від мідних і гібридних мережевих інфраструктур до волоконно-оптичних рішень із прямим підключенням абонента, відомих під загальною назвою FTTH. Цей процес зумовлений лавиноподібним зростанням споживання цифрового контенту, активним впровадженням хмарних платформ та Інтернету речей, а також вимогами до низьких затримок і стабільності з'єднання, що висуваються новими застосунками – від відеоконференцій до дистанційного керування промисловими об'єктами. За даними міжнародних аналітичних організацій, зокрема IDATE DigiWorld та FTTH Council Europe [14, 15], станом на початок 2025 року глобальне охоплення домогосподарств оптичними мережами типу FTTH/V перевищило 40%, при цьому найвищі показники демонструють країни Азійсько-Тихоокеанського регіону – Китай, Японія – де відсоток підключених домогосподарств давно перетнув позначку 70–80%. Серед європейських країн-лідерів варто відзначити Іспанію, Португалію та Швецію, які забезпечили охоплення FTTH на рівні 60–80% завдяки активній державній підтримці та ефективній регуляторній політиці. В Україні розвиток широкосмугових мереж доступу також набирає темпів, попри суттєві виклики, пов'язані з воєнним станом та пошкодженням інфраструктури. За даними Національного регулятора у сфері електронних комунікацій, проникнення фіксованого широкосмугового доступу до мережі Інтернет у 2024 році становило близько 65–70% серед міських домогосподарств.

Провідні оператори – Київстар, Vodafone Україна, lifecell, а також численні регіональні ISP – активно інвестують у розгортання GPON-інфраструктури як у великих містах, так і в районних центрах [11].

Серед ключових тенденцій, що визначають розвиток мереж доступу у найближчі роки, можна виокремити такі напрями. Перший напрям – масштабна оптимізація абонентської мережі. Більшість операторів як в

Україні, так і у світі здійснюють планомірний перехід від технологій xDSL та DOCSIS до оптичних рішень GPON та XGS-PON. Цей процес прискорюється внаслідок фізичного зносу мідної кабельної інфраструктури та неможливості забезпечити на ній швидкості, затребувані ринком.

Другий напрям – впровадження симетричних гігабітних сервісів. Зростання популярності хмарних сховищ, відеостримінгу в форматах 4K/8K та дистанційної роботи формує попит не лише на широкий вхідний канал, але й на значну пропускну здатність у напрямку від абонента до мережі. Технологія XGS-PON, що забезпечує симетричну швидкість 10 Гбіт/с, розглядається як стратегічний наступник GPON для провідних операторів.

Третій напрям – конвергенція фіксованих і мобільних мереж. Розгортання мереж 5G вимагає щільної мережі точок підключення радіомодулів (базових станцій малого радіусу дії) до транспортної інфраструктури. Пасивні оптичні мережі GPON та XGS-PON є економічно ефективним транспортним середовищем для з'єднання центральних вузлів обробки з радіомодулями мережі 5G, де до одного порту OLT підключаються кілька малих базових станцій.

Четвертий напрям – розвиток бездротового широкосмугового доступу як доповнення до фіксованих мереж. Технологія FWA на базі мереж 5G дозволяє оперативно підключати абонентів у районах із недостатньо розвиненою кабельною інфраструктурою, скорочуючи цифровий розрив між міськими та сільськими територіями.

1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі бакалаврської роботи здійснено теоретичний аналіз сучасних технологій мереж доступу та їх місця в структурі електронних комунікаційних мереж. Розглянуто роль мереж доступу як базового елемента телекомунікаційної інфраструктури, що забезпечує підключення кінцевих користувачів до мережі оператора та значною мірою визначає якісні

показники надання електронних комунікаційних послуг. У ході дослідження проведено узагальнення та порівняння мереж доступу і транспортних мереж за основними критеріями, зокрема функціональним призначенням, особливостями топології, довжиною ліній зв'язку, а також вимогами до пропускної здатності й надійності. Встановлено, що мережі доступу характеризуються високим ступенем розгалуженості, значною кількістю абонентських підключень і підвищеними вимогами до економічної ефективності, що зумовлює необхідність застосування технологій, здатних до гнучкого масштабування. Також виконано класифікацію мереж доступу за середовищем передавання, принципами побудови та топологічними особливостями, що дало змогу систематизувати сучасні підходи до організації абонентського доступу. Порівняльний аналіз дротових і бездротових технологій показав, що, незважаючи на мобільність і гнучкість бездротових рішень, волоконно-оптичні дротові мережі забезпечують значно вищу стабільність з'єднання, кращі показники пропускної здатності та мають більш перспективний потенціал для подальшого розвитку. Окрему увагу приділено пасивним оптичним мережам, які розглянуто як один із найбільш ефективних і сучасних підходів до побудови мереж доступу. Проаналізовано принципи їх функціонування, архітектурні особливості та виконано порівняння з традиційними мідними і активними мережевими рішеннями.

РОЗДІЛ 2. СТАНДАРТИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ GPON

2.1 Стандарти побудови пасивних оптичних мереж

Побудова пасивних оптичних мереж (PON) регламентується серією рекомендацій ITU-T, які визначають архітектуру мережі, параметри фізичного середовища, принципи передачі даних, та сумісність обладнання. Кожен стандарт охоплює окремий рівень або аспект функціонування PON-систем, що забезпечує комплексний підхід до проєктування та експлуатації таких мереж.

На рисунку 2.1 представлено ієрархію стандартів ITU-T, що регулюють побудову пасивних оптичних мереж

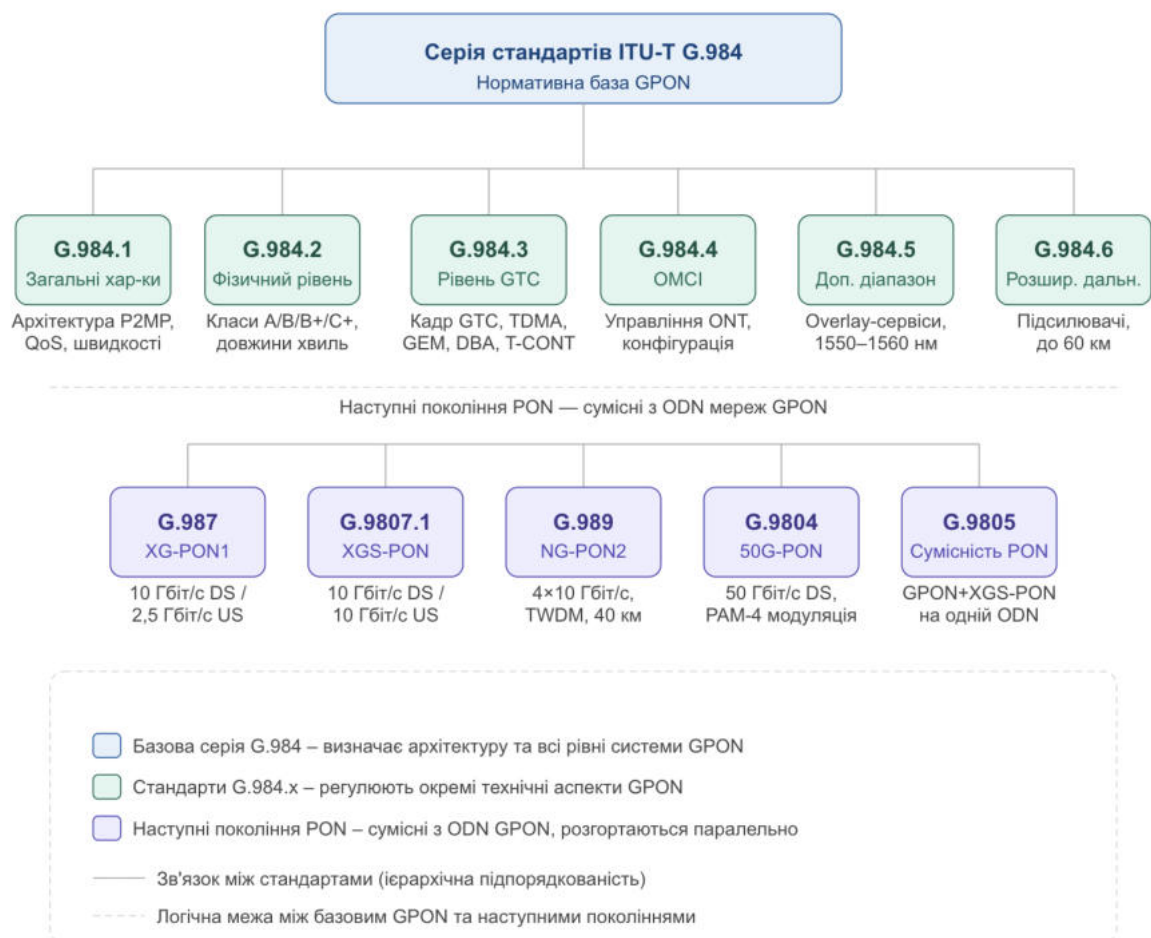


Рисунок 2.1 – Ієрархія стандартів ITU-T, що регулюють побудову пасивних оптичних мереж

Стандартизація є необхідною умовою для розвитку PON-ринку, оскільки гарантує взаємозамінність обладнання різних виробників та можливість поступової модернізації мережі без демонтажу пасивної оптичної розподільчої мережі. Саме принцип сумісності з існуючою ODN, закладений у кожному новому поколінні стандартів, є головною конкурентною перевагою технологічної родини PON порівняно з іншими підходами до побудови мереж доступу. У таблиці 2.1 наведено зведений перелік основних стандартів ІТУ-Т, що регулюють побудову пасивних оптичних мереж, із зазначенням їх предмету регулювання та року прийняття.

Таблиця 2.1 – Основні стандарти ІТУ-Т у сфері пасивних оптичних мереж

Стандарт	Назва	Рік прийняття	Ключові визначення
G.984.1	General characteristics	2003/2008	Архітектура P2MP, вимоги QoS, швидкості передачі, принципи мультиплексування
G.984.2	PMD layer specification	2003/2019	Оптичні параметри OLT/ONT, довжини хвиль, бюджети потужності, класи A/B/B+/C+
G.984.3	Transmission Convergence layer	2004/2014	Структура кадру GTC (125 мкс), TDMA upstream, GEM-інкапсуляція, DBA, T-CONT, PLOAM
G.984.4	ONT management and control interface	2008	Протокол OMCI: конфігурація ONT, керування VLAN, QoS, оновлення прошивки
G.984.5	Enhancement band	2007/2014	Додатковий спектральний діапазон 1550–1560 нм

Продовження таблиці 2.1

G.984.6	Reach extension	2008/2012	Підсилювачі та ретранслятори: дальність до 60 км, коефіцієнт розгалуження до 1:128
G.987	XG-PON1	2010	Downstream 9,953 Гбіт/с / Upstream 2,488 Гбіт/с; хвилі DS 1577 нм / US 1270 нм
G.9807.1	XGS-PON	2016	Симетрична швидкість 9,953 Гбіт/с; хвилі DS 1577 нм / US 1270 нм; сумісна ODN з GPON
G.989	NG-PON2	2015	TWDM: 4 хвильові канали $\times$ 10 Гбіт/с = 40 Гбіт/с; дальність до 40 км; 1:256
G.9804	50G-PON	2021	РАМ-4 модуляція; 49,766 Гбіт/с DS / 25 Гбіт/с US; хвилі 1596/1284 нм; класи до 35 дБ
G.9802	MW-PON	2019	Багатохвильова PON: одночасна передача N оптичних каналів;
G.9805	Coexistence of PON systems	2019	Сумісна робота GPON/XG-PON/XGS-PON/NG-PON2 через WDM-фільтри

Стандарт G.984.1 (GPON: General characteristics) визначає загальні характеристики мереж GPON. У ньому описано базову архітектуру мережі, включаючи взаємодію між OLT (Optical Line Terminal) та ONT/ONU (Optical

Network Terminal / Unit), топологію типу «точка–багатоточка», принципи розподілу пропускної здатності, а також загальні вимоги до якості обслуговування (QoS). Крім того, стандарт задає базові параметри швидкостей передачі та основні принципи мультиплексування [6].

Стандарт G.984.2 (PMD layer specification) регламентує параметри фізичного рівня (Physical Media Dependent). У ньому визначаються оптичні характеристики передавачів і приймачів, довжини хвиль для передачі у прямому та зворотному напрямках, рівні потужності сигналу, чутливість приймачів, а також допустимі втрати в оптичній лінії. Це дозволяє забезпечити сумісність обладнання різних виробників і стабільну роботу мережі [7].

Стандарт G.984.3 (Transmission Convergence layer) описує рівень конвергенції передачі (TC layer), який відповідає за формування кадрів, інкапсуляцію даних, мультиплексування потоків від різних абонентів та управління доступом до середовища передачі [8].

У ньому визначено механізм TDMA (Time Division Multiple Access) для висхідного каналу, структуру кадру GPON та алгоритми динамічного розподілу смуги пропускання (DBA).

Стандарт G.984.4 (ONT management and control interface) регламентує інтерфейси керування та моніторингу абонентських пристроїв (ONT/ONU).

Основна увага приділяється протоколу OMCI, який забезпечує централізоване управління обладнанням з боку OLT, включаючи конфігурацію, оновлення та контроль стану мережі [9].

Стандарт G.984.5 (Enhancement band) визначає використання додаткового спектрального діапазону для розширення можливостей GPON. Це дозволяє впроваджувати нові сервіси або підвищувати пропускну здатність без повної модернізації існуючої інфраструктури [10].

Стандарт G.984.6 (Reach extension) описує методи збільшення дальності дії мережі GPON. У ньому визначено використання підсилювачів або ретрансляторів для подолання обмежень стандартної довжини лінії, що особливо актуально для сільських або віддалених регіонів.

Стандарт G.989 (NG-PON2) регламентує системи з використанням мультиплексування за довжиною хвилі (WDM), що дозволяє досягати швидкостей до 40 Гбіт/с і більше.

Основна увага приділяється гнучкому розподілу ресурсів, масштабованості та підтримці великої кількості абонентів.

Стандарт G.9802 (MW-PON) описує багатохвильові PON-мережі, де використовується одночасна передача кількох оптичних каналів. Це підвищує ефективність використання оптичного спектра та дозволяє значно збільшити загальну пропускну здатність мережі.

Стандарт G.9805 (Coexistence of PON systems) регламентує сумісне функціонування різних поколінь PON (GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2) в одній оптичній інфраструктурі. Це дозволяє операторам поступово модернізувати мережу без відключення існуючих абонентів.

Отже, сукупність зазначених стандартів формує повну нормативну базу для проєктування, впровадження та експлуатації пасивних оптичних мереж різних поколінь, забезпечуючи їх масштабованість, сумісність і підтримку сучасних телекомунікаційних сервісів.

2.2 Особливості технології GPON

Технологія GPON є однією з найбільш технічно розвинених реалізацій пасивних оптичних мереж доступу, що забезпечує високошвидкісну передачу даних на основі використання оптичного волокна та пасивних елементів розгалуження. Її архітектура побудована за принципом «точка–багатоточка», де центральний вузол обслуговує групу абонентських терміналів через пасивну розподільчу мережу. Такий підхід дозволяє значно зменшити кількість активного обладнання поза межами центрального вузла – у розподільчих шафах, кабельних колодязях та абонентських приміщеннях, що підвищує надійність системи та знижує експлуатаційні витрати на її обслуговування. Функціонування GPON базується на поєднанні часового та

спектрального мультиплексування. У низхідному напрямку передача даних здійснюється у вигляді широкомовного потоку від OLT до всіх ONT (рис. 2.2), причому кожен абонент ідентифікує та обробляє лише призначені йому дані.

У висхідному напрямку використовується множинний доступ із часовим розподілом, що передбачає передачу даних від абонентів у строго визначені часові інтервали.

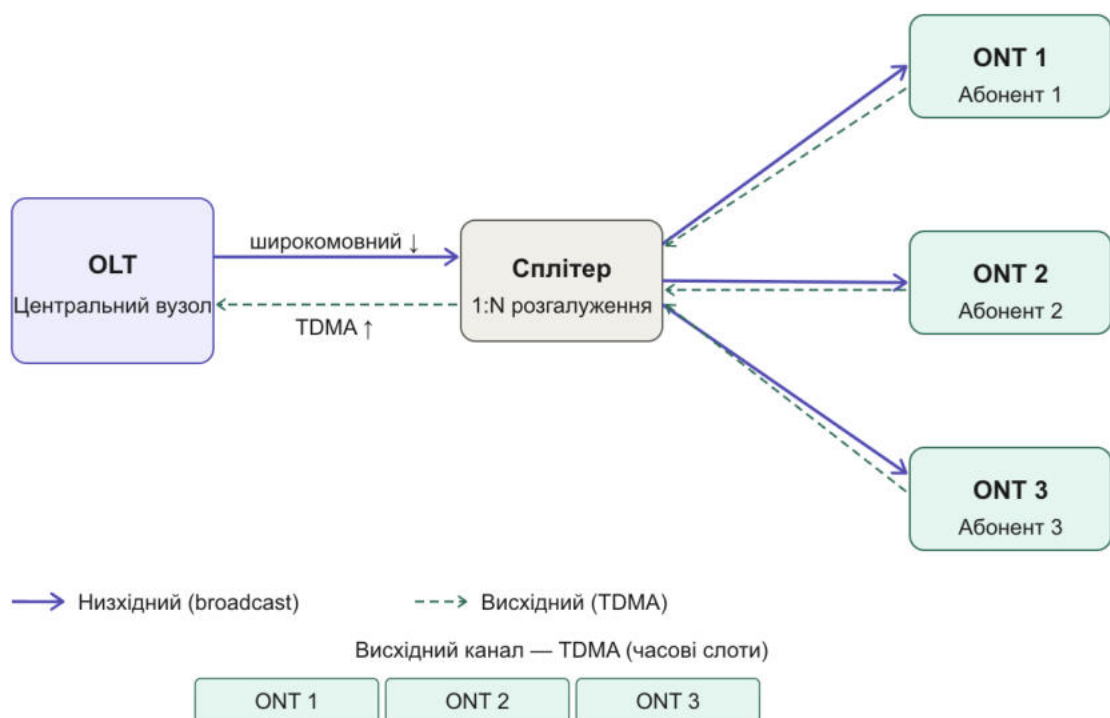


Рисунок 2.2 – Організація передачі даних у мережі GPON

Така організація виключає колізії в каналі та забезпечує детермінований характер передачі. Важливою особливістю технології є жорстка синхронізація всієї системи, оскільки всі абонентські вузли мають передавати дані строго у відведені часові інтервали, а будь-яке відхилення призвело б до накладання сигналів і втрати даних. Для цього головний вузол постійно вимірює затримку поширення сигналу до кожного абонента і коригує момент початку його передачі – цей механізм називається вирівнюванням дальності. Передача

даних у GPON організована у вигляді кадрів із фіксованим періодом 125 мкс, що дозволяє інтегрувати трафік реального часу (наприклад, голос або відео) без значних затримок.

Центральний вузол формує структуру кадру, керує розподілом ресурсів і забезпечує координацію всіх підключених абонентів. Ключовим механізмом ефективного використання пропускної здатності є динамічний розподіл смуги. На відміну від статичних схем, DBA дозволяє в режимі реального часу змінювати обсяг ресурсів, що виділяються кожному абоненту, залежно від його поточного навантаження та пріоритету трафіку. Це особливо важливо для підтримки мультисервісності, оскільки різні типи трафіку (IP-дані, VoIP, IPTV) мають різні вимоги до затримок та пропускної здатності.

На рисунку 2.3 представлений принцип функціонування GPON.

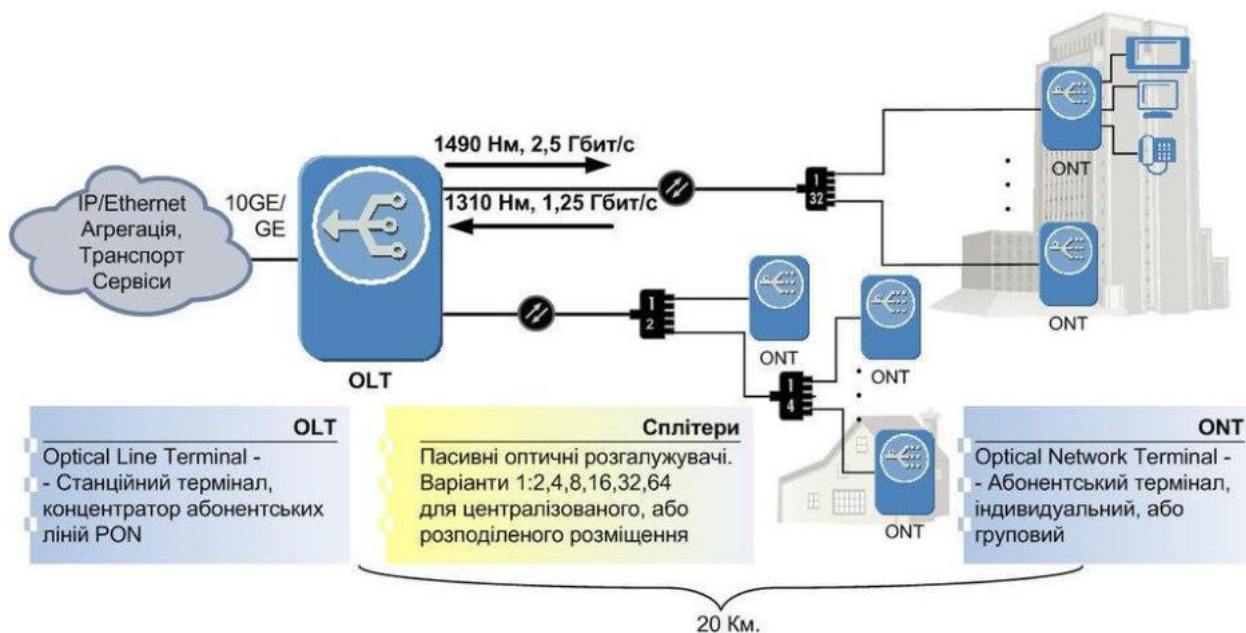


Рисунок 2.3 – Архітектура та принцип функціонування мережі GPON [16]

У центрі архітектури мережі розташований оптичний лінійний термінал – OLT, підключений до транспортної мережі оператора. OLT забезпечує агрегацію та обробку трафіку різних типів: IP, Ethernet і сервісів передачі даних. У низхідному напрямку використовується довжина хвилі 1490 нм із пропускною здатністю до 2,5 Гбіт/с, у висхідному – 1310 нм із максимальною швидкістю 1,25 Гбіт/с. Для підключення кількох абонентів до одного порту

OLT у розподільчій мережі застосовуються пасивні оптичні сплітери. Залежно від потреб, вони можуть ділити сигнал у різних співвідношеннях – від 1:2 до 1:64, що дає змогу підключити до одного порту десятки абонентів. На стороні користувача розміщуються оптичні мережеві термінали, які перетворюють оптичний сигнал на електричний. Основою передавання в GPON слугує кадр GTC (рис. 2.4). Його тривалість чітко фіксована і становить 125 мкс, що відповідає частоті повторення 8000 кадрів за секунду. Таке значення обрано не випадково – воно збігається з інтервалом дискретизації, який використовується в голосових TDM-каналах (PCM, 8 кГц), завдяки чому транспортування голосу та TDM-сервісів значно спрощується.



Рисунок 2.4 – Структура кадру GTC мережі GPON

Низхідний кадр GTC складається з фізичного заголовка PCBd та поля корисного навантаження обсягом до 38 880 байт. Заголовок PCBd містить синхрослово, ідентифікатори активних ONT, інформацію про виділення смуги пропускання та PLOAM-повідомлення, що використовуються для керування абонентськими терміналами. Поле корисного навантаження містить GEM-фрейми, кожен з яких адресований конкретному абоненту – ONT ідентифікує

призначені йому фрейми за значенням Port-ID та ігнорує решту. Висхідний кадр формується абонентськими терміналами в суворо відведених часових інтервалах відповідно до механізму TDMA.

Він містить кілька службових полів: PLOu – преамбулу для синхронізації приймача OLT, PLOAMu – поле для передачі керуючих повідомлень від ONT, DBRu – звіт про стан черг передачі, на підставі якого OLT здійснює динамічне виділення смуги пропускання. Решту кадру займає корисне навантаження у вигляді GEM-фреймів з даними абонента.

Детальний опис полів кадру наведений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Структура низхідного кадру GTC

Поле кадру	Розмір	Призначення
PCBd – Physical Control Block	125 байт	Блок управління фізичним рівнем: синхронізація, OAM, BW Map
Psync (Physical Synchronization)	4 байти	Слово синхронізації кадру: 0xB6AB31E0 (фіксоване значення)
Ident	4 байти	Лічильник кадрів + ключ AES (1 біт FEC-індикатор)
PLOAM повідомлення	13 байт	Downstream PLOAM: активація ONU, діагностика, призначення ONU-ID
BIP	1 байт	Перевірка парності для виявлення помилок
Plend	4 байти * 2	Довжина ATM та GEM секцій у кадрі (дублюється для надійності)
BWmap	4*N байт	Карта смуги пропускання
Payload (корисне навантаження)	~38 495 байт	GEM-фреймова секція: дані користувача, упаковані в GEM-фрейми

Особливу роль у структурі кадру GTC відіграє поле VIP (побітовий перемежований контроль парності – однобайтове поле в заголовку PCBd, що використовується для моніторингу якості оптичного каналу). VIP є одним із механізмів контролю якості лінії в GPON: ONU обчислює власний VIP для отриманих байтів і порівнює з VIP OLT. Кількість виявлених невідповідностей передається назад до OLT у вигляді лічильника VIP-помилки у висхідному потоці. Поле BWmap є важливим елементом системи TDMA в GPON. Карта смуги пропускання містить записи для кожного T-CONT всіх активних ONU в ідентичному порядку – Start Time, Stop Time та Flag-байт [16].

Механізм T-CONT є ключовим інструментом управління якістю обслуговування у висхідному напрямку в технології GPON. Він реалізує логічну абстракцію, що дозволяє ефективно організувати доступ до спільного оптичного середовища між багатьма абонентськими пристроями. T-CONT є логічним об'єктом у складі оптичного мережевого термінала, який агрегує трафік одного або кількох GEM-портів і формує запити на виділення смуги пропускання до оптичного лінійного термінала. Відповідно до рекомендації ITU-T G.984.3, визначено п'ять типів T-CONT, кожен з яких характеризується різним рівнем гарантування смуги пропускання та пріоритетності обслуговування. Процес реєстрації та активації ONU в мережі GPON є складним багатоетапним процесом, який регламентується стандартом ITU-T G.984.3 і передбачає призначення ідентифікатора та конфігурування сервісів.

Послідовність кроків активації наведена у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Послідовність реєстрації та активації ONU в мережі GPON [18]

Крок	Фаза	Опис дій
1	Serial Number State	OLT виявляє нові ONU шляхом тихого вікна (Quiet Window). ONU надсилає свій серійний номер (64-бітний унікальний ідентифікатор SN).

Крок	Фаза	Опис дій
2	Ranging State	OLT вимірює відстань до ONU за допомогою RTT. Обчислюється Equalization Delay для синхронізації TDMA-доступу.
3	Operation State	ONU отримує ONU-ID (0–253) та починає повноцінну роботу. Призначаються T-CONT та GEM-порти через OMCI-протокол.
4	OMCI Configuration	OLT конфігурує ONU за допомогою протоколу OMCI: VLAN, QoS, сервіси, шифрування.
5	Active (робочий стан)	ONU повністю активний. Передача даних користувача здійснюється відповідно до виділеної смуги BWmap.

Критично важливим кроком є вимірювання відстані. Оскільки всі ONU підключені до одного OLT, але знаходяться на різних фізичних відстанях (від кількох сотень метрів до 20 км), затримки поширення сигналу для кожного ONU різні. Для коректної роботи TDMA необхідно, щоб усі ONU надсилали свої дані у строго визначені часові слоти так, нібито всі вони знаходяться на однаковій відстані. Для цього OLT вимірює час поширення сигналу в прямому і зворотному напрямках RTT та обчислює значення вирівнюючої затримки. ONU затримує свій передавач рівно на значення EqD, тим самим компенсуючи різницю у відстанях. Логічна відстань, до якої нормується TDMA, становить 20 км [18]. Оскільки у технології GPON низхідний потік передається широкомовним способом – тобто кожен ONU фізично отримує весь трафік, що передається від OLT, – шифрування є обов'язковим елементом забезпечення

конфіденційності даних абонентів. Стандарт G.984.3 передбачає шифрування корисного навантаження GEM-фреймів за алгоритмом AES-128 з довжиною ключа 128 біт у режимі CTR. Процедура управління ключами шифрування здійснюється через PLOAM повідомлення. OLT генерує новий 128-бітний ключ шифрування та надсилає його до конкретного ONU у зашифрованому вигляді (захист ключа забезпечується через протокол OMCI).

Ротація ключів відбувається з налаштовуваною періодичністю (типово кожні 30–60 секунд) для підвищення рівня захисту.

Вихідний потік від ONU до OLT не шифрується стандартом G.984.3 (за замовчуванням), оскільки кожен ONU не може отримати сигнал від іншого ONU внаслідок властивостей направленої оптичного каналу [19].

2.3 Обладнання, що підтримує технологію GPON

Технологія GPON потребує злагодженої роботи кількох категорій обладнання, розподіленого між трьома рівнями: центральним вузлом інтернет сервіс-провайдера, пасивною розподільчою мережею та приміщенням кінцевого абонента.

Центральний елемент будь-якої GPON-мережі знаходиться на стороні провайдера. Тут розміщується активне обладнання, яке забезпечує управління абонентами та транспортування трафіку до мережі Інтернет.

Ключовим елементом є OLT – пристрій, що виконує функції централізованого контролера для оптичних абонентських терміналів у мережі.

OLT є центральним вузлом керування: він ініціалізує кожен ONT в мережі за унікальним серійним номером (SN) або паролем, розподіляє часові слоти передачі (T-CONT) відповідно до класів трафіку QoS, а також здійснює шифрування потоку даних у напрямку «вниз» (downstream) за допомогою алгоритму AES-128. Без OLT жоден абонентський термінал ONT не може функціонувати – це обов'язкова складова системи.

Для наочності нижче розглядається комплект обладнання від виробника ZTE Corporation – одного з постачальників GPON-рішень на ринку України.

На рисунку 2.5 представлена структура GPON-мережі.



Рисунок 2.5 – Структура GPON-мережі

В таблиці 2.3 представлено обладнання центрального офісу ISP (на прикладі ZTE).

Таблиця 2.3 – Обладнання центрального офісу ISP

Назва обладнання	Модель ZTE	Призначення	Основні характеристики
OLT	ZXA10 C320	Головний оптичний термінал, агрегація ліній	До 1024 ONT; GPON/XG-PON; 640 Гбіт/с
OLT-картки GPON	GTGH / GTGO	Лінійні карти підключення абонентів PON	8 або 16 GPON-портів; кожен до 128 ONT

Аплінк-картки	HUVQ / HUVE	З'єднання OLT з магістральною мережею	4×10GE або 4×25GE uplink-портів
Маршрутизатор ядра	ZXR10 T8000	Маршрутизація трафіку до Інтернет	BGP, MPLS; до 6,4 Тбіт/с
NMS-сервер	ZTE NetNumen	Централізоване управління мережею	Web-інтерфейс, моніторинг, автопровізіонування
BRAS / BNG	ZXR10 M6000	Авторизація абонентів, тарифікація	PPPoE/IPoE; RADIUS; до 256 тис. сесій
Патч-панель ODF	ODF-144/288	Кросування оптичних волокон при OLT	SC/APC або LC/APC рознімачі

Особливість GPON полягає у повній пасивності розподільчої мережі: жодного активного (електронного) обладнання між офісом ISP та приміщенням абонента не існує. Вся розподільча мережа складається виключно з волоконно-оптичних кабелів та пасивних оптичних сплітерів. Ця властивість є принциповою конкурентною перевагою GPON над іншими технологіями – Active Ethernet, VDSL2, HFC – оскільки суттєво зменшує витрати на обслуговування мережі. Центральним пасивним елементом є оптичний сплітер – пристрій, який фізично розгалужує один вхідний оптичний потік на кілька вихідних без будь-якого перетворення сигналу.

Сплітери виготовляються за технологією PLC і мають коефіцієнти розгалуження 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32 та 1:64. В реальних мережах сплітери включаються каскадно у двох рівнях: перший рівень розміщується у вуличних або підвальних шафах FDN, другий – у будинкових коробках на технічних поверхах. Загальний коефіцієнт розгалуження в GPON-мережі не може перевищувати 1:128 – саме така максимальна кількість абонентських терміналів ONT, які може обслуговувати один порт OLT.

В таблиці 2.4 представлені компоненти пасивної розподільчої мережі.

Таблиця 2.4 – Компоненти пасивної розподільчої мережі GPON

Компонент	Тип / стандарт	Місце встановлення	Функція
Магістральний ВОК	G.652D / G.657A2	Від OLT до вузлової шафи (FDH)	Транспортування сигналу OLT
Сплітер 1-го рівня	PLC 1:4 або 1:8	Вуличні / підвальні шафи (FDH)	Перший поділ оптичного сигналу
Розподільний ВОК	G.657A1 / G.657A2	Від FDH до будинків	З'єднання між рівнями сплітерів
Сплітер 2-го рівня	PLC 1:8 або 1:16	Будинкові оптичні шафи	Другий поділ сигналу до квартир
Абонентський ВОК	G.657A2 drop-cable	Від будинкової шафи до квартири	Підведення волокна до абонента
Оптична розетка FTB	SC/APC	Всередині квартири абонента	Місце підключення патч-корду ONT
FOSC-муфта	Прохідна	Зовнішня прокладка кабелю	Захист зварних з'єднань волокна

На стороні абонента встановлюється оптичний мережевий термінал – ONT або ONU. Цей пристрій є точкою демаркації між мережею провайдера та домашньою мережею абонента. ONT перетворює оптичний сигнал у електричний і розподіляє його між домашніми пристроями через порти Ethernet, Wi-Fi та телефонні порти FXS. ONT виконує кілька критично важливих функцій одночасно. По-перше, він реалізує протокол PLOAM (Physical Layer OAM), за допомогою якого реєструється в мережі OLT і отримує унікальний ідентифікатор ALLOC-ID. По-друге, ONT здійснює розшифрування вхідного (downstream) трафіку, зашифрованого OLT за AES-128. По-третє, він управляє якістю обслуговування: пріоритизує голосовий трафік VoIP над звичайним HTTP-трафіком, забезпечуючи мінімальну затримку для телефонних дзвінків. По-четверте, більшість сучасних ONT обладнані вбудованим маршрутизатором та точкою доступу Wi-Fi, що

дозволяє забезпечувати бездротовий доступ до мережі Інтернет без необхідності встановлення додаткового обладнання. Модельний ряд ONT від ZTE охоплює широкий спектр пристроїв – від найпростіших однопортових терміналів для базового підключення до потужних корпоративних шлюзів з підтримкою десятків Ethernet-портів.

В таблиці 2.5 представлено мінімальний комплект обладнання для підключення одного абонента.

Таблиця 2.5 – Мінімальний комплект обладнання для підключення абонента

Компонент	Кількість	Хто забезпечує	Де розміщується
ONT (ZXA10 F660)	1 шт.	ISP (оренда) або абонент	Всередині квартири / офісу
Патч-корд SC/APC — SC/APC	1 шт. (0,5–3 м)	ISP або абонент	Від оптичної розетки до ONT
Оптична розетка FTB (SC/APC)	1 шт.	ISP	На стіні квартири
Блок живлення ONT (12V DC)	1 шт.	Входить у комплект ONT	Розетка 220V
Кабель RJ-45 (патч-корд)	1-4 шт.	Абонент	Від ONT до ПК / TV-приставки

Для того щоб технологія GPON запрацювала, необхідне чітке дотримання послідовності монтажних та налаштувальних робіт. На першому етапі провайдер встановлює та підключає OLT в центральному офісі, налаштовує маршрутизатор ядра і BRAS, конфігурує NMS-сервер. OLT підключається до мережі Інтернет через uplink-порти, і налаштовуються GPON-лінійні карти з відповідними VLAN та профілями трафіку. На другому етапі будівельники прокладають магістральний волоконно-оптичний кабель від офісу ISP до вузлових FDN-шаф, виконують зварювання волокон та монтаж сплітерів першого рівня. Потім монтується розподільний кабель від FDN до будинкових шаф, де встановлюються сплітери другого рівня.

На третьому етапі виконується абонентське підключення: монтажники прокладають drop-кабель від будинкової шафи до квартири, встановлюють

оптичну розетку FTB. Після цього технік ISP встановлює ONT, підключає його до розетки, і пристрій автоматично починає процедуру реєстрації на OLT.

2.4 Висновки до другого розділу

Встановлено, що серія стандартів ITU-T G.984 формує повну ієрархічну нормативну базу для побудови GPON-мереж, де кожен документ регулює окремий технічний аспект: G.984.2 – параметри оптичного фізичного середовища, G.984.3 – структуру кадру та механізми доступу, G.984.4 – протокол управління абонентськими терміналами. Визначено, що фіксована тривалість кадру GTC 125 мкс обрана не випадково – вона збігається з частотою дискретизації голосових PCM-каналів, що дозволяє передавати TDM-сервіси без додаткової буферизації. Встановлено, що поєднання широкомовної передачі у напрямку від оператора до абонента та часового розподілу каналу у зворотному напрямку дозволяє ефективно використовувати пропускну здатність оптичного каналу при одночасному обслуговуванні до 128 абонентів від одного порту OLT. З'ясовано, що точна синхронізація та індивідуальна компенсація затримок для кожного ONT є обов'язковою умовою коректного функціонування TDMA-доступу, оскільки абоненти розташовані на різних відстанях від OLT.

Показано, що шифрування низхідного трафіку за алгоритмом AES-128 є необхідним елементом безпеки, оскільки широкомовна передача фізично доставляє весь трафік до кожного ONT у мережі.

Встановлено, що використання пасивної інфраструктури в розподільчому сегменті суттєво підвищує надійність системи та знижує операційні витрати оператора за рахунок відсутності активних вузлів, що потребують електроживлення та обслуговування.

РОЗДІЛ 3. ПРИКЛАД ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ GPON

3.1 Архітектура мережі доступу та спосіб підключення абонентів

Мережа доступу є кінцевою ділянкою телекомунікаційної інфраструктури, що забезпечує передачу трафіку від вузла агрегації оператора безпосередньо до приміщення абонента. Саме ця ділянка визначає реальну якість сервісу, що отримує кінцевий користувач, і є найбільш капіталомісткою складовою всієї мережі доступу. Для реалізації проєкту обрано технологію GPON відповідно до стандарту ITU-T G.984, яка забезпечує швидкість передачі даних до 2,488 Гбіт/с у напрямку від оператора до абонента та до 1,244 Гбіт/с у зворотному напрямку при використанні пасивної розподільчої мережі без активних проміжних елементів. Для конкретного розрахунку обрано типовий об'єкт підключення: багатоквартирний будинок (БКБ) на 32 квартири, розташований на відстані 3 км від вузла оператора. Будинок має 4 під'їзди по 8 квартир у кожному, 4 поверхи. Такий об'єкт є типовим для міської забудови та дозволяє наочно продемонструвати повний цикл проєктування мережі GPON від центрального вузла до обладнання.

Архітектура мережі GPON для підключення БКБ будується за дворівневою схемою розгалуження оптичного сигналу. На першому рівні розгалуження встановлюється PLC-сплітер 1x4 у входному вузлі будинку (FDH), що розподіляє сигнал між чотирма під'їздами.

На другому рівні в кожному під'їзді встановлюється PLC-сплітер 1x8, який обслуговує 8 абонентських квартир. Загальний коефіцієнт розгалуження складає 1x32, що відповідає максимально допустимому значенню для GPON В+ класу. Транспортна частина мережі від вузла оператора до будинку реалізується за допомогою магістрального одномодового оптичного кабелю ОКК-0,22-8 з 8 волокнами типу SMF-28 відповідно до стандарту G.652.D. Кабель прокладається в існуючій кабельній каналізації або кріпиться по стіні

будівлі. Ввід кабелю до будинку здійснюється через кабельний ввід у технічному приміщенні першого поверху, де монтується вхідний вузол у вигляді оптичної розподільчої коробки FDH-72.

На рисунку 3.1 представлена схема прокладання волоконно-оптичного кабелю мережі GPON у багатоквартирному житловому будинку.

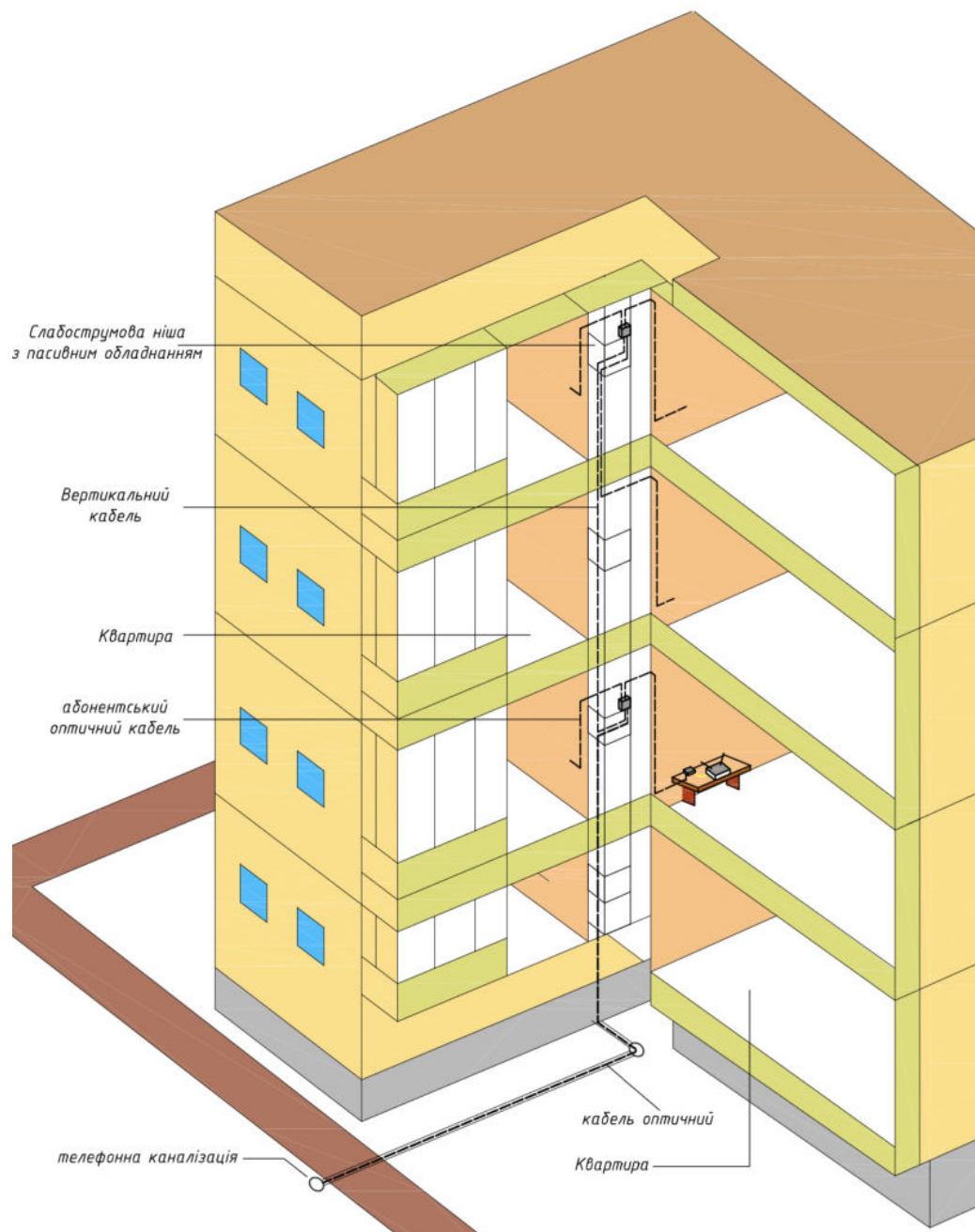


Рисунок 3.1 – Схема прокладання волоконно-оптичного кабелю мережі GPON у багатоквартирному житловому будинку

Зовнішня інфраструктура представлена підземною телефонною каналізацією, прокладеною вздовж периметру будівлі, по якій здійснюється введення магістрального одномодового оптичного кабелю типу G.652D у будівлю через герметичний кабельний ввід із захистом від механічних пошкоджень та атмосферних впливів. Магістральний кабель, позначений на схемі як «кабель оптичний», є сегментом лінії передачі між головним вузлом оператора OLT та пасивною розподільчою мережею ODN всередині будівлі. Вертикальна кабельна траса прокладена у виділеній шахті по стояку будівлі, що відповідає вимогам ДБН В.2.2-15 щодо організації слабострумових комунікацій у житлових будинках. Вертикальний оптичний кабель типу «Indoor» з підвищеною вогнестійкістю забезпечує розподіл оптичного сигналу по поверхах будівлі та підключення до пасивного обладнання, розміщеного у слабострумових нішах. Слабострумова ніша з пасивним обладнанням, розташована на кожному поверсі або через визначений інтервал, містить оптичний спліттер – ключовий пасивний елемент мережі GPON, що здійснює розгалуження оптичного сигналу без використання активних електронних компонентів та зовнішнього електроживлення. Коефіцієнт розгалуження спліттера, як правило, становить 1:8 або 1:16 на рівні будівлі, що у поєднанні з каскадним розгалуженням дозволяє досягти загального коефіцієнту 1:64, стандартного для мереж GPON відповідно до рекомендації ITU-T G.984.

Монтаж спліттера у слабострумовій ніші виконується у спеціалізованому захисному боксі зі ступенем захисту не нижче IP-20 для внутрішнього встановлення, що забезпечує механічний захист волоконно-оптичних з'єднань та запобігає їх пошкодженню під час технічного обслуговування суміжного обладнання. Підключення вертикального кабелю до входу спліттера та дроп-кабелів до його виходів здійснюється через зварні з'єднання з наступним захистом термоусадковими гільзами КДЗС, що забезпечує нормоване загасання зварного стику не більше 0,05 дБ відповідно до вимог ITU-T G.984.2. Абонентський оптичний кабель – дроп-кабель типу FTTH з одним волокном стандарту G.657A2 – прокладається від виходу

спліттера у ніші безпосередньо до квартири абонента. Вибір типу волокна G.657A2 зумовлений його підвищеною стійкістю до вигинів малого радіусу – до 7,5 мм, - що є важливим при прокладанні кабелю у вузьких будівельних конструкціях, дверних коробах та кабельних каналах мінімального перерізу.

Всередині будинку по стояках (технічних шахтах) прокладається розподільчий кабель ОККМ-0,22-4 з 4 волокнами. Цей кабель з'єднує FDH-вузол з поверховими сплітерними боксами, розміщеними в кожному під'їзді. На останньому етапі від поверхового боксу до квартири прокладається абонентський дроп-кабель FTTH з одним волокном G.657A2, що характеризується підвищеною стійкістю до вигинів і є стандартним рішенням для внутрішньобудинкового монтажу. У квартирі встановлюється абонентський оптичний мережевий термінал, що виконує функцію перетворення оптичного сигналу GPON у стандартний електричний сигнал Ethernet для підключення абонентського обладнання.

На рисунку 3.2 представлена архітектура мережі GPON для підключення 32 абонентів багатоквартирного будинку.

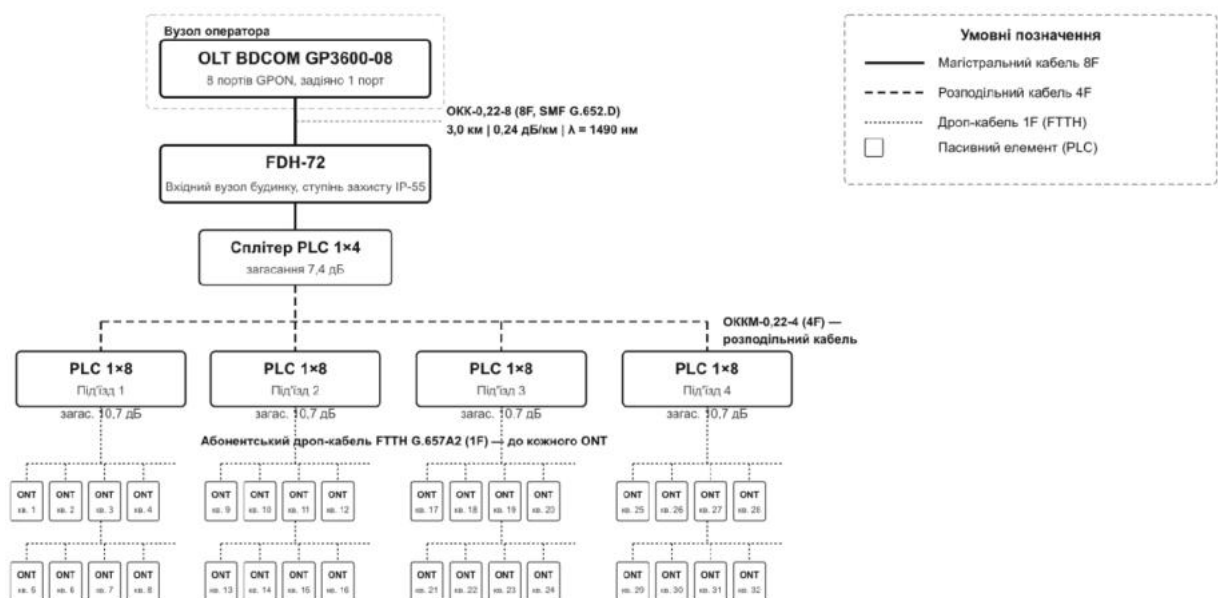


Рисунок 3.2 – Архітектура мережі GPON для підключення 32 абонентів багатоквартирного будинку (дворівнева схема розгалуження)

Рисунок 3.2 відображає структурну схему мережі GPON, побудованої за дворівневою архітектурою пасивного оптичного розгалуження для підключення 32 абонентів багатоквартирного будинку. На верхньому рівні схеми розміщено активний елемент мережі – оптичний лінійний термінал OLT BDCOM GP3600-08, встановлений на вузлі оператора та обладнаний 8 портами GPON, з яких для обслуговування даного об'єкта задіяно один порт. Від виходу порту GPON прокладається магістральний одномодовий оптичний кабель марки ОКК-0,22-8 з вісьмома волокнами типу SMF стандарту G.652.D загальною довжиною 3,0 км із питомим загасанням 0,24 дБ/км на робочій довжині хвилі 1490 нм у напрямку до абонента. Магістральний кабель вводиться до вхідного вузла будинку, яким є оптична розподільча коробка FDH-72 зі ступенем захисту корпусу IP-55, що забезпечує розміщення та комутацію волоконно-оптичних з'єднань на введенні в будівлю.

Безпосередньо у вузлі FDH-72 встановлено пасивний планарний сплітер першого рівня PLC 1×4 із нормованим загасанням 7,4 дБ, який розподіляє оптичний сигнал на чотири рівних виходи відповідно до кількості під'їздів будинку. Від виходів сплітера першого рівня по стояках будівлі прокладається розподільний кабель ОККМ-0,22-4 з чотирма волокнами, що з'єднує FDH-вузол із поверховими сплітерними боксами кожного під'їзду. На другому рівні розгалуження в кожному з чотирьох під'їздів встановлено окремий пасивний планарний сплітер PLC 1×8 із загасанням 10,7 дБ, що забезпечує розподіл сигналу між вісьмома абонентськими квартирами відповідного під'їзду.

Далі, на рисунку 3.3 представлено представлено детальну схему організації абонентського підключення в мережі GPON на рівні поверху багатоквартирного будинку – від слабострумової ніші у коридорі до абонентського обладнання у квартирі. Ліва частина схеми відображає коридорний простір поверху, де у стіні розміщено слабострумову нішу з відчиненими дверцятами. В середині ніші встановлено оптичний бокс, який конструктивно поєднує у собі касету для зберігання запасів оптичного волокна та зварних з'єднань, планку з адаптерами SC/APC для комутації абонентських

дроп-кабелів, а також пасивний оптичний спліттер PLC другого рівня розгалуження. Наявність декількох рядів портових адаптерів на лицьовій панелі боксу свідчить про конфігурацію спліттера типу 1×8, що відповідає обслуговуванню абонентів під'їзду від єдиного волоконно-оптичного входу.

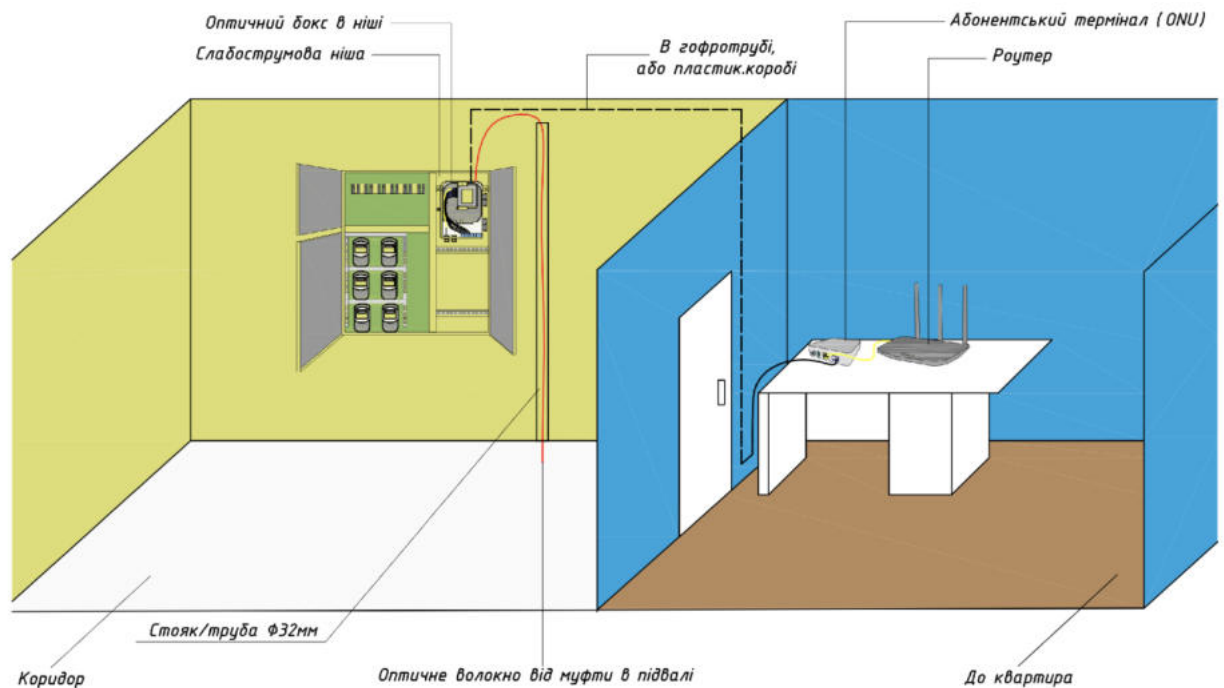


Рисунок 3.3 – Організація абонентського підключення в мережі GPON на рівні поверху будівлі

Оптичне волокно, що надходить від розподільчої муфти у підвальному приміщенні, підводиться до боксу знизу через стояк – трубу діаметром Ф32 мм, прокладену вертикально крізь перекриття поверхів будівлі.

Використання жорсткої захисної труби стандартного діаметру Ф32 мм забезпечує механічний захист волокна у зоні прохідного отвору та відповідає вимогам щодо організації слабострумівих комунікацій у житлових будинках.

Від оптичного боксу у ніші абонентський дроп-кабель прокладається у горизонтальному напрямку через коридор до квартири абонента у гофрованій трубі або пластиковому кабельному короб – спосіб прокладання обирається залежно від конструктивних особливостей будівлі та вимог замовника.

Застосування гофротруби або пластикового кабельного коробу забезпечує механічний захист одномодового дроп-кабелю стандарту G.657A2, запобігає його перегинанню з радіусом, меншим за допустимий, а також відповідає вимогам пожежної безпеки для прокладання кабелів у місцях загального користування. Права частина схеми відображає внутрішній простір квартири абонента. На столі розміщено два пристрої: абонентський термінал ONU та маршрутизатор Wi-Fi. ONU виконує функцію перетворення оптичного сигналу GPON у електричний сигнал стандарту Ethernet 1000Base-T, здійснює реєстрацію в мережі OLT за протоколом PLOAM, розшифровує низхідний трафік, захищений алгоритмом AES-128, та забезпечує управління якістю обслуговування QoS для різних типів трафіку. Маршрутизатор, підключений до порту Ethernet ONU патч-кордом RJ-45, здійснює розподіл Інтернет-з'єднання між пристроями абонента за технологіями проводового Ethernet та бездротового Wi-Fi, забезпечуючи повнофункціональне підключення всіх пристроїв домашньої мережі до послуг оператора. Слід зазначити, що більшість сучасних моделей ONU, зокрема HG8310M, обраний у даному прикладі, підтримують також інтерфейси FXS для підключення аналогових телефонних апаратів з метою надання послуг VoIP-телефонії.

Представлена схема наочно демонструє кінцевий сегмент пасивного оптичного тракту мережі GPON – від розподільчого вузла поверху до абонентського обладнання – та відображає типові технічні рішення для організації підключення квартирних абонентів у багатоквартирних будинках.

3.2 Розрахунок оптичного бюджету оптичної лінії GPON

Оптичний бюджет є ключовим розрахунковим показником при проєктуванні будь-якої пасивної оптичної мережі. Він визначає максимально допустиме загасання оптичного сигналу в лінії між передавачем OLT та приймачем ONT, при якому якість прийому сигналу залишається в межах нормованих значень відповідно до стандарту ITU-T G.984. Правильний

розрахунок оптичного бюджету дозволяє обґрунтовано обрати клас системи GPON, тип і кількість сплітерів, допустиму довжину ліній.

Оптичний бюджет потужності визначається як різниця між мінімальною вихідною потужністю передавача та мінімальною чутливістю приймача. Стандарт ITU-T G.984.2 визначає чотири класи оптичних систем GPON, що відрізняються допустимими діапазонами вихідних потужностей передавачів та чутливостей приймачів. Клас А має бюджет потужності 20 дБ і застосовується у мережах з невеликою кількістю абонентів та короткими лініями. Клас В забезпечує бюджет 25 дБ і підходить для мереж із коефіцієнтом розгалуження до 1:32. Клас В+ з бюджетом 28 дБ є найпоширенішим у комерційних розгортаннях: він підтримує розгалуження до 1:64 на відстані до 20 км і є оптимальним балансом між вартістю обладнання та можливостями мережі. Клас С+ з бюджетом 32 дБ призначений для мереж із максимальним коефіцієнтом розгалуження 1:128 або значними довжинами ліній. Вибір класу системи визначає вимоги до обладнання: чим вищий клас, тим потужніші передавачі та чутливіші приймачі необхідні як для OLT, так і для ONT, що безпосередньо впливає на вартість обладнання. Для розглянутого у даній роботі проєкту обрано клас В+, оскільки загальний коефіцієнт розгалуження мережі становить 1:32, а відстань від вузла оператора до об'єкта – 3 км, що з великим запасом вкладається у допустимі параметри цього класу. Для системи GPON класу В+ відповідно до стандарту ITU-T G.984.2 нормовані значення мають такий вигляд: мінімальна вихідна потужність передавача OLT на довжині хвилі 1490 нм становить +1,5 дБм (типове значення +4 дБм), мінімальна чутливість приймача ONT становить мінус 27 дБм.

Розрахунок бюджету потужності виконується за формулою:

$$PB = P_{TX(OLT)} - P_{RXmin(ONT)}$$

$$PB = (+4) - (-27) = +31 \text{ дБм} - (-27 \text{ дБм}) = 28 \text{ дБ}$$

де PB є оптичним бюджетом потужності в дБ;

$P_{TX(OLT)}$ є мінімальною вихідною потужністю передавача OLT в дБм;

$P_{RXmin(ONT)}$ є мінімальною чутливістю приймача ONT в дБм.

Отримане значення бюджету потужності 28 дБ (при типових значеннях 31 дБ) відповідає класу В+ системи GPON і є вихідним значенням для подальшого розрахунку бюджету загасання лінії.

Бюджет загасання оптичної лінії є сумарним загасанням сигналу в оптичному тракті від виходу передавача OLT до входу приймача ONT. Загасання складається з таких основних складових: загасання оптичного волокна, загасання на з'єднувачах, загасання на зварювальних стиках.

Загасання оптичного волокна у напрямку від OLT до ONT (довжина хвилі 1490 нм) розраховується за формулою:

$$A_{\text{волокно}}(1490) = \alpha(1490) * L$$

$$A_{\text{волокно}}(1490) = 0,24\text{дБ/км} \times 3\text{км} = 0,72\text{ дБ}$$

де $A_{\text{волокно}}(1490)$ є загасанням волокна на довжині хвилі 1490 нм; $\alpha(1490)$ є питомим загасанням волокна на довжині хвилі 1490 нм, що дорівнює 0,24 дБ/км для стандартного SMF G.652.D; L є довжиною оптичного тракту в кілометрах. Аналогічно, загасання у зворотному напрямку (від ONT до OLT) на довжині хвилі 1310 нм:

$$A_{\text{волокно}}(1310) = \alpha(1310) * L$$

$$A_{\text{волокно}}(1310) = 0,36\text{дБ/км} \times 3\text{км} = 1,08\text{ дБ}$$

Загасання на конекторних парах (з'єднувачах SC/APC) розраховується виходячи з нормованого значення загасання однієї конекторної пари:

$$A_{\text{conn}} = n_{\text{conn}} * a_{\text{conn}}$$

$$A_{\text{conn}} = 4 \times 0,5\text{ дБ} = 2,00\text{ дБ}$$

де A_{conn} є сумарним загасанням на конекторах; n_{conn} є кількістю конекторних пар у тракті (4 з'єднувачі: OLT-кросс, кросс-FDH, FDH-сплітер, сплітер-ONT); a_{conn} є загасанням однієї конекторної пари SC/APC, що дорівнює 0,5 дБ.

Загасання на зварювальних стиках:

$$A_{splice} = n_{splice} * a_{splice}$$

$$A_{splice} = 8 \times 0,05 \text{ дБ} = 0,40 \text{ дБ}$$

де n_{splice} є кількістю зварювальних стиків у тракті (8 зварок для 1 км магістральної ділянки та розподільчих ліній всередині будинку з урахуванням муфт); a_{splice} є загасанням одного зварного стику, що нормується 0,05 дБ.

Загасання на сплітерах PLC (дворівнева схема розгалуження). Для сплітера першого рівня PLC 1x4 нормоване загасання відповідно до специфікацій планарних сплітерів становить 7,4 дБ. Для сплітера другого рівня PLC 1x8 нормоване загасання становить 10,7 дБ.

Сумарне загасання на сплітерах:

$$A_{split} = A_{split1} + A_{split2}$$

$$A_{split} = 7,4 \text{ дБ} + 10,7 \text{ дБ} = 18,1 \text{ дБ}$$

Сумарне загасання оптичного тракту без урахування запасу (на довжині хвилі 1490 нм):

$$A_{total} = A_{fiber}(1490) + A_{conn} + A_{splice} + A_{split}$$

$$A_{total} = 0,72 + 2,00 + 0,40 + 18,10 = 21,22 \text{ дБ}$$

З урахуванням системного запасу на старіння волокна та конекторів, нерівномірність сплітерів і непередбачені нерівності 1,0 дБ:

$$A_{total}(\text{з запасом}) = 21,22 + 1,00 = 22,22 \text{ дБ}$$

Порівняння розрахункового загасання з бюджетом потужності системи:

$$PB - A_{total}(\text{з запасом}) = 28 - 22,2 = 5,78 \text{ дБ} > 0$$

Позитивний залишковий запас (margin) 5,78 дБ підтверджує коректність обраної архітектури мережі та достатність бюджету потужності системи GPON класу B+ для забезпечення стабільної передачі сигналу до всіх 32 абонентів об'єкту при заданих параметрах мережі.

Відповідно до вимог стандарту, залишковий запас повинен бути не менше 3 дБ, що виконується з перевищенням.

В таблиці 3.1 представлено зведений розрахунок оптичного бюджету загасання.

Таблиця 3.1 – Зведений розрахунок оптичного бюджету загасання

Складова	Значення	Кількість	Сумарне загасання, дБ
Оптичне волокно (0,36 дБ/км при 1310 нм), 3 км	0,36 дБ/км	3 км	1,08
Оптичне волокно (0,24 дБ/км при 1490 нм), 3 км	0,24 дБ/км	3 км	0,72
З'єднувачі SC/APC (на стороні OLT + ODN)	0,5 дБ/шт	4 шт	2,00
Зварювальні стики	0,05 дБ/шт	8 шт	0,40
Сплітер PLC 1x4 (перший рівень)	7,4 дБ	1 шт	7,40
Сплітер PLC 1x8 (другий рівень)	10,7 дБ	1 шт	10,70

Запас на старіння та нерівномірність	-	-	1,00
Сумарне загасання	-	-	23,30

Аналіз наведених у таблиці 3.1 даних свідчить, що домінуючою складовою загасання оптичного тракту є загасання на сплітерах, яке становить 18,10 дБ з 22,22 дБ загального бюджету загасання, або 81,5% від загальних втрат. Це є характерною особливістю PON-архітектур із пасивним розгалуженням. Загасання волокна, конекторів та зварних з'єднань у сукупності не перевищує 4,12 дБ, що свідчить про якісне виконання монтажних робіт при дотриманні нормованих значень втрат. На підставі архітектурної схеми мережі, та розрахунків оптичного бюджету виконано визначення складу, кількості та обсягів всього обладнання і матеріалів, необхідних для будівництва GPON-мережі для підключення 32 абонентів БКБ.

Активне обладнання мережі включає OLT-платформу BDCOM GP3600-08 (рис. 3.4), що забезпечує 8 портів GPON з можливістю нарощення до 64 абонентських ліній. Для даного проєкту задіяно 1 порт GPON, до якого підключено 32 ONT через дворівневе пасивне дерево.



Рисунок 3.4 – OLT-платформа BDCOM GP3600-08

Як абонентські термінали обрано ONT Huawei EchoLife HG8310M (рис. 3.5) з одним портом Gigabit Ethernet, що є стандартним рішенням для підключення абонентів із послугою широкосмугового Інтернет-доступу.



Рисунок 3.5 – ONT Huawei EchoLife HG8310M

Розрахунок довжини магістрального кабелю виконується з урахуванням нормативного запасу 10% на монтажні допуски, введення в муфти та закладення в терміналах:

$$L_{mag} = L_{route} * (1 + K_{reserve})$$
$$L_{mag} = 900 \text{ м} \times 1,1 = 990 \text{ м} \approx 1000 \text{ м}$$

Розрахунок довжини розподільного кабелю по стояках з урахуванням 4 під'їздів висотою 12 м (4 поверхи по 3 м) та 10% запасу:

$$L_{dist} = N_{entrance} * H_{building} * K_{reserve}$$
$$L_{dist} = 4 \times 48 \text{ м} \times 1,1 = 211 \text{ м (з урахуванням прокладок 600 м)}$$

Середня довжина дроп-кабелю від поверхового боксу до квартири приймається рівною 25 м з урахуванням прокладки по коридору та вертикального підйому:

$$L_{drop} = N_{ONT} * L_{avg} * K_{reserve}$$

$$L_{drop} = 32 \times 25 \text{ м} \times 1,2 = 960 \text{ м}$$

де N_{ONT} є кількістю абонентських терміналів (32 ONT); L_{avg} є середньою довжиною дроп-кабелю 25 м; $K_{reserve}$ є коефіцієнтом запасу 1,2 (з урахуванням 20% запасу на монтаж та відходи). Для 32 портів ONT, 8 сплітерів другого рівня та 2 сплітерів першого рівня необхідна кількість пігтейлів:

$$N_{pig} = N_{splitter} + N_{FDH} + N_{reserve}$$

$$N_{pig} = (8 \times 8) + (2 \times 4) + 8 = 64 + 8 + 8 = 80 \text{ шт}$$

Детальна специфікація обладнання та матеріалів з технічними характеристиками наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Специфікація обладнання та матеріалів для GPON-мережі

№	Найменування обладнання та матеріалів	Одиниця виміру	Кількість	Технічні характеристики
Активне обладнання				
1	OLT BDCOM GP3600-08 (8 портів GPON)	шт	1	8xGPON, 4xSFP+, AC/DC
2	GPON SFP-трансивер (B+ клас) для OLT	шт	2	TX +4 дБм, RX -28 дБм, SC/APC
3	ONT Huawei EchoLife HG8310M (1xGE)	шт	32	GPON B+, 1xGE, SC/APC
Пасивне обладнання ODN				
4	Сплітер PLC 1x4 у боксі (FDH-вузол, 1-й рівень)	шт	2	SC/APC, IL не більше 7,4 дБ
5	Сплітер PLC 1x8 у боксі (поверховий, 2-й рівень)	шт	8	SC/APC, IL не більше 10,7 дБ

Продовження таблиці 3.2

6	Оптична розподільча коробка FDH-72 (вхідний вузол)	шт	1	72 SC/APC адаптери, IP-55
7	Оптична муфта FOCS-400 (для зварних з'єднань магістралі)	шт	2	96 зварок, IP-68
8	Термінальна абонентська коробка FTTH (під'їзд)	шт	4	8 портів SC/APC
Кабельна продукція				
9	ОКК-0,22-8 (магістральний кабель, 8 волокон SM G.652.D)	м	1000	Бронь, РЕ-оболонка, для каналізації
10	ОККМ-0,22-4 (розподільчий кабель по стояку, 4 волокна)	м	600	Мікроброня, LSZH
11	Абонентський кабель FTTH (дроп-кабель, 1 волокно G.657A2)	м	960	Плоский, LSZH, самонесний
Монтажні матеріали та аксесуари				
12	Пігтейл SC/APC 0,9 мм, 1,5 м	шт	80	SM, G.652.D
13	Патчкорд SC/APC SC/APC, 3 м	шт	32	SM, duplex, LSZH
14	Кабельний організатор у шафу 1U	шт	2	19", 24 порти SC
15	Кріплення кабелю (скоби, хомути, кабель-канал 40x20 мм)	компл	1	Пластикові + металеві
16	Гільзи КДЗС для сварки	шт	100	60 мм, термоусадка
17	ШТК (телекомунікаційна шафа) 19", 6U настінна	шт	1	IP-54, зі скляними дверцятами
18	ДБЖ 1000 VA	шт	1	Line-interactive

Специфікація охоплює 18 позицій чотирьох категорій: активне обладнання, пасивне обладнання ODN, кабельна продукція та монтажні матеріали. Активна частина включає OLT BDCOM GP3600-08, два SFP-

трансивери класу В+ та 32 абонентських термінали ONT Huawei HG8310M. Пасивна частина ODN сформована сплітерами PLC двох рівнів розгалуження, вхідною коробкою FDH-72, оптичними муфтами FOSC-400 та під'їздними боксами FTTH. Кабельна продукція загальним обсягом 2560 м включає магістральний кабель ОКК-0,22-8, розподільний ОККМ-0,22-4 та абонентський дроп-кабель G.657A2, а монтажні матеріали забезпечують повний комплект для зварювання, комутації та розміщення обладнання.

Орієнтовна вартість реалізації розглянутого прикладу підключення багатоквартирного будинку на 32 абоненти, розрахована на підставі актуальних ринкових цін станом на 2026 рік, становить близько 226 280 грн без ПДВ. Найбільшу частку витрат формує активне обладнання (OLT та ONT) – близько 42%, кабельна продукція – близько 38%, пасивне обладнання ODN та монтажні матеріали – решту 20%.

3.3 Перспективи розвитку пасивних оптичних мереж

Технологія GPON, впроваджена відповідно до стандарту ITU-T G.984 та розглянута у попередніх розділах як базове рішення для побудови мереж доступу, є одним із етапів безперервної еволюції пасивних оптичних мереж. Стрімке зростання потреб абонентів у пропускній здатності, зумовлене поширенням відеоконтенту у форматах 4K та 8K, масовим впровадженням хмарних обчислень, розгортанням мереж п'ятого покоління 5G та розвитком концепції Інтернету речей, формує технологічну необхідність переходу до нових поколінь PON із суттєво вищими швидкісними та масштабними характеристиками. Принципово важливою особливістю цього переходу є те, що кожне нове покоління PON проектується із забезпеченням зворотної сумісності з існуючою пасивною оптичною інфраструктурою ODN, збудованою для GPON. Це означає, що волоконно-оптичний кабель, сплітери та кабельні траси, змонтовані відповідно до архітектури, описаної в даній

роботі, слугуватимуть середовищем для наступних поколінь активного обладнання без необхідності демонтажу або переукладання пасивної частини.

Першим поколінням 10-гігабітних пасивних оптичних мереж є технологія XG-PON1, стандартизована в рекомендації ITU-T G.987 у 2010 році. Вона забезпечує швидкість передачі даних до абонента 9,953 Гбіт/с та від абонента 2,488 Гбіт/с, що у чотири рази перевищує аналогічні показники GPON у напрямку до абонента. Для уникнення спектральних конфліктів із GPON технологія XG-PON1 використовує довжини хвиль 1577 нм для передачі до абонента та 1270 нм для передачі від абонента, що дозволяє розгортати XG-PON1 паралельно з GPON на одній фізичній ODN за допомогою пасивних хвильових фільтрів CWDM без відключення існуючих абонентів. Максимальний коефіцієнт розгалуження збільшено до 1:256, що вдвічі перевищує можливості GPON і дозволяє суттєво знизити питому вартість підключення одного абонента. Симетрична версія цієї технології XGS-PON, стандартизована в рекомендації ITU-T G.9807.1 у 2016 році, забезпечує симетричну швидкість 9,953 Гбіт/с в обох напрямках, що є критично важливим для підключення корпоративних клієнтів із рівномірними потребами у завантаженні та вивантаженні трафіку, а також для підключення базових станцій 5G у рамках організації транспортного з'єднання між центральним вузлом обробки та радіомодулями мобільної мережі.

Стандарт NG-PON2, прийнятий у рекомендації ITU-T G.989 у 2015 році [20], є найбільш технологічно складним представником родини PON та реалізує принципово новий підхід до організації передачі даних на основі технології TWDM, що поєднує часове мультиплексування з хвильовим. У базовій конфігурації система NG-PON2 одночасно підтримує чотири незалежних хвильових канали з пропускною здатністю 10 Гбіт/с кожен, забезпечуючи сукупну швидкість передачі до абонента 40 Гбіт/с та від абонента 10 Гбіт/с в межах одного оптичного волокна. Кожен абонентський термінал ONT обладнується перебудовуваним лазером і перебудовуваним оптичним фільтром, що дозволяє динамічно переключатись між хвильовими

каналами залежно від поточного навантаження мережі, забезпечуючи гнучкий розподіл ресурсів між абонентами. Збільшена максимальна дальність дії до 40 км у порівнянні з 20 км для GPON розширює географічний охопит мережі без додаткових активних підсилювачів.

Стандарт 50G-PON, прийнятий ITU-T у рекомендації G.9804 у 2021 році, забезпечує лінійну швидкість передачі 49,766 Гбіт/с до абонента та 25,0 Гбіт/с від абонента в рамках єдиного хвильового каналу TDM.

Для досягнення таких швидкостей застосовується передова технологія чотирирівневої імпульсно-амплітудної модуляції PAM-4 у поєднанні з широкосмуговими фотоприймачами та лазерними діодами з прямою модуляцією. Застосування нових довжин хвиль 1596 нм для передачі до абонента та 1284 нм для передачі від абонента виключає спектральне перекриття з попередніми поколіннями PON і дозволяє розгортати 50G-PON на існуючій ODN GPON без модифікацій пасивної інфраструктури. Стандарт передбачає три операційних класи з максимальним бюджетом потужності до 35 дБ, що дозволяє обслуговувати мережі з коефіцієнтом розгалуження до 1:256. При типовому розгалуженні 1:64 кожен абонент отримує гарантовану швидкість понад 750 Мбіт/с, що з урахуванням зростаючого споживання відеоконтенту у форматі 8K та розвитку застосунків доповненої і віртуальної реальності забезпечує запас пропускної здатності на горизонт 2030-2035 років.

Технологія 100G-PON знаходиться на стадії активної стандартизації в рамках рекомендації ITU-T G.9806. Досягнення лінійної швидкості 100 Гбіт/с і вище в рамках одноканальної TDM-передачі є технічно складним завданням через обмеження пропускної здатності одиночного оптичного каналу, тому 100G-PON фактично передбачає перехід до розширеного хвильового мультиплексування TWDM із збільшеним числом каналів, де кожен функціонує на швидкостях 25-50 Гбіт/с. Паралельно з розвитком TDM-PON активно досліджується технологія WDM-PON, що принципово відрізняється від усіх попередніх поколінь: кожен абонент отримує виділений індивідуальний хвильовий канал, що забезпечує повну фізичну ізоляцію

трафіку, гарантовану пропускну здатність та відсутність залежності якості обслуговування від активності сусідніх абонентів.

Така архітектура є оптимальною для підключення корпоративних клієнтів, центрів обробки даних та базових станцій 5G, де вимоги до ізоляції трафіку є критично важливими. Комерційне впровадження рішень на базі WDM-PON очікується в період 2026-2030 років.

Одним із найважливіших напрямків практичного застосування побудованої GPON-інфраструктури є її використання як транспортного середовища для мереж п'ятого покоління 5G. Архітектура 5G передбачає функціональну декомпозицію базової станції на три блоки: центральний вузол обробки, розподілений вузол та радіомодуль.

Між цими блоками необхідні оптичні канали з жорсткими вимогами до затримки не більше одиниць мілісекунд та пропускну здатності від кількох сотень мегабіт до кількох гігабіт на секунду. GPON та XGS-PON вже сьогодні активно застосовуються для підключення радіомодулів малих базових станцій 5G у міській забудові, де один порт OLT обслуговує кілька радіомодулів через розподільчу мережу.

Аналіз технологічного розвитку пасивних оптичних мереж дозволяє виділити три ключові тенденції.

По-перше, кожне нове покоління PON забезпечує чотири-п'ятикратне збільшення пропускну здатності порту при відносно помірному зростанні вартості активного обладнання: перехід від GPON до XGS-PON збільшує швидкість у чотири рази, від XGS-PON до 50G-PON у п'ять разів.

По-друге, принцип зворотної сумісності нових поколінь з існуючою ODN GPON, закріплений у стандарті ITU-T G.9805, гарантує довгострокову актуальність збудованої кабельної інфраструктури: ODN, змонтована сьогодні, слугуватиме середовищем передачі для XGS-PON, NG-PON2, 50G-PON та наступних поколінь без змін у пасивній частині мережі.

Наведена нижче таблиця 3.4 узагальнює порівняльні характеристики всіх поколінь пасивних оптичних мереж за ключовими параметрами.

Таблиця 3.4 – Порівняльна характеристика технологій оптичних мереж

Параметр	GPON	XG-PON1	XGS-PON	NG-PON2	50G-PON	100G-PON
Стандарт ІТУ-Т	G.984	G.987	G.9807.1	G.989	G.9804	G.9806
Швидкість до абонента, Гбіт/с	2,488	9,953	9,953	4 x 10	49,766	100+
Швидкість від абонента, Гбіт/с	1,244	2,488	9,953	4 x 2,5	25,0	25-100
Коефіцієнт розгалуження	1:128	1:256	1:256	1:256	1:256	1:256+
Довжина хвилі DS / US, нм	1490/1310	1577/1270	1577/1270	TWDM L-band	1596/1284	TWDM C-band
Максимальна відстань OLT-ONT, км	20	20	20	40	20	20+

Аналіз таблиці 3.4 наочно демонструє вектор технологічного розвитку: швидкість передачі до абонента зростає від 2,488 Гбіт/с у GPON до понад 100 Гбіт/с у перспективних системах 100G-PON, тобто збільшується більш ніж у сорок разів при збереженні незмінною пасивної оптичної інфраструктури. Коефіцієнт розгалуження зростає з 1:128 до 1:256 вже починаючи з XG-PON1, що дозволяє обслуговувати вдвічі більшу кількість абонентів від одного порту OLT. Дальність дії збільшується до 40 км у стандарті NG-PON2, що розширює географічний охопит мережі без додаткових активних елементів.

Таким чином, вибір технології GPON як основи для побудови мережі доступу є економічно та технічно обґрунтованим рішенням, що забезпечує не лише задоволення поточних потреб абонентів у пропускній здатності, але й

довгострокову захищеність капітальних інвестицій оператора в оптичну кабельну інфраструктуру на термін не менше двадцяти п'яти років.

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі розглянуто практичний приклад побудови мережі доступу на основі технології GPON для підключення 32 абонентів багатоквартирного будинку, розташованого на відстані 3 км від вузла оператора. Обґрунтовано вибір технології GPON як оптимального рішення для даного об'єкта: пасивна архітектура розподільчої мережі забезпечує високу надійність за рахунок відсутності активних елементів у польовому сегменті, а швидкість передачі до 2,488 Гбіт/с у напрямку до абонента з надлишком покриває поточні потреби користувачів. Розглянуто дворівневу архітектуру пасивного розгалуження зі сплітерами PLC 1×4 на рівні вхідного вузла будинку та сплітерами PLC 1×8 на рівні під'їздів, загальний коефіцієнт розгалуження якої становить 1:32. Розрахунок оптичного бюджету підтвердив достатність обраної системи класу В+: сумарне загасання оптичного тракту з урахуванням системного запасу становить 22,22 дБ, а залишковий запас потужності 5,78 дБ перевищує мінімально допустиме значення 3 дБ, що гарантує стабільну роботу мережі протягом усього строку експлуатації. Встановлено, що домінуючою складовою загасання є втрати на сплітерах – 81,5% від загального бюджету, що є характерною особливістю PON-архітектур. Орієнтовна вартість реалізації розглянутого прикладу становить близько 226 280 грн без ПДВ. Аналіз перспектив розвитку PON показав, що збудована пасивна оптична інфраструктура ODN є сумісною з наступними поколіннями активного обладнання – XGS-PON, NG-PON2 та 50G-PON відповідно до стандарту ITU-T G.9805, що забезпечує можливість збільшення пропускної здатності мережі більш ніж у сорок разів без демонтажу або заміни змонтованого волоконно-оптичного кабелю та пасивних елементів ODN.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі проведено дослідження технологій мереж доступу та здійснено проєктування мережі доступу на основі технології GPON. Встановлено, що мережа доступу є ключовим сегментом телекомунікаційної інфраструктури, який безпосередньо визначає якість послуг, що надаються кінцевим користувачам.

Проведена класифікація за типом середовища передавання, принципом побудови та топологією дозволила систематизувати сучасні підходи до організації абонентського доступу. Порівняльний аналіз дротових і бездротових технологій підтвердив, що волоконно-оптичні мережі забезпечують значно вищу стабільність з'єднання, кращі показники пропускної здатності та мають найбільший потенціал для довгострокового розвитку. Встановлено, що топологія «точка–багатоточка» з пасивними елементами розгалуження є оптимальною для організації абонентського доступу, а технологія PON – найбільш перспективним її втіленням.

У другому розділі проведено детальний аналіз стандартів та технічних особливостей технології GPON. Розглянуто нормативну базу серії рекомендацій ITU-T G.984, яка охоплює всі рівні функціонування системи – від фізичного середовища до механізмів управління та забезпечення сумісності обладнання. Досліджено принципи організації передачі даних у низхідному та висхідному напрямках, структуру кадру GTC із фіксованим інтервалом 125 мкс, механізм TDMA та алгоритми динамічного розподілу пропускної здатності DBA. Визначено, що поєднання широкомовної передачі у напрямку від оператора до абонента та часового розподілу каналу у напрямку від абонента до оператора дозволяє ефективно використовувати пропускну здатність оптичного каналу при одночасному обслуговуванні великої кількості абонентів. Визначено склад основного обладнання GPON-мереж та його функціональне призначення.

У третьому розділі розглянуто приклад побудови мережі доступу на основі технології GPON для підключення 32 абонентів багатоквартирного будинку. Пасивна архітектура розподільчої мережі забезпечує високу надійність за рахунок відсутності активних елементів у польовому сегменті, а швидкість передачі до 2,488 Гбіт/с у напрямку до абонента покриває поточні потреби користувачів. Розрахунок оптичного бюджету підтвердив достатність обраної системи класу В+: сумарне загасання оптичного тракту з урахуванням системного запасу становить 22,22 дБ, а залишковий запас потужності 5,78 дБ перевищує мінімально допустиме значення 3 дБ, що гарантує стабільну роботу мережі протягом усього строку експлуатації.

Розглянуто перспективи розвитку пасивних оптичних мереж у напрямку XGS-PON, NG-PON2, 50G-PON та 100G-PON. Продемонстровано, що кожне нове покоління активного обладнання PON є сумісним з існуючою пасивною оптичною інфраструктурою ODN відповідно до стандарту ITU-T G.9805, що означає можливість багаторазового збільшення пропускної здатності мережі без демонтажу або переукладання змонтованого волоконно-оптичного кабелю та пасивних елементів розподільчої мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про електронні комунікації» від 16.12.2020 № 1089-IX. *Відомості Верховної Ради України*. Київ, 2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1089-20> (дата звернення: 20.03.2025).
2. ITU-T Recommendation G.983.1: Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON). Geneva: ITU, 2005. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.1> (дата звернення: 20.03.2025).
3. ITU-T Recommendation G.983.3: A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation. Geneva: ITU, 2001. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.3> (дата звернення: 20.03.2025).
4. IEEE Std 802.3ah-2004: Ethernet in the First Mile. New York: IEEE, 2004. URL: <https://www.ieee802.org/3/efm> (дата звернення: 20.03.2025).
5. IEEE Std 802.3av-2009: 10 Gb/s PHY for EPON. New York: IEEE, 2009. URL: <https://www.ieee802.org/3/av> (дата звернення: 20.03.2025).
6. ITU-T Recommendation G.984.1: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics. Geneva: ITU, 2008. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1> (дата звернення: 20.03.2025).
7. ITU-T Recommendation G.984.2: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical layer specification. Geneva: ITU, 2019. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2> (дата звернення: 20.03.2025).
8. ITU-T Recommendation G.984.3: Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification. Geneva: ITU, 2014. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3> (дата звернення: 20.03.2025).
9. ITU-T Recommendation G.984.4: Gigabit-capable passive optical networks (G-PON). Geneva: ITU, 2008. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.4> (дата звернення: 20.03.2025).
10. ITU-T Recommendation G.984.5: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Enhancement band. Geneva: ITU, 2014. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.5> (дата звернення: 20.03.2025).

11. Що таке технологія GPON, навіщо вона потрібна і як працює // Flycom: технічний блог. 2025. URL: <https://flycom.ua/scho-take-technologia-gpon-navisho-vona/> (дата звернення: 20.03.2026).
12. Штомпель М. А., Швидкий В. Ю. Аналіз технологій пасивних оптичних мереж // Матеріали IX Всеукр. наук.-практ. конф. Полтава: НУПП, 2023. С. 112–115. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14121> (дата звернення: 20.03.2026).
13. Uzunidis D., Matrakidis C., Stavdas A. et al. Dynamic bandwidth allocation in time division multiplexed passive optical networks: a dual-standard analysis of ITU-T and IEEE standard algorithms. *PeerJ Computer Science*. 2025. Vol. 11. e2700. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2700>.
14. Ростовський Н. Технології PON, APON, EPON, GPON у мережах на оптоволокну та їх особливості // Матеріали наук.-практ. конф. – Полтава: ПДАУ, 2022. С. 56–62. URL: <https://dSPACE.pdau.edu.ua/items/403c0dc7-e1b3-4a5d-b87a-b873a8991ebf> (дата звернення: 20.03.2026).
15. Fiber to the Premises – PONdering the Details. IpInfusion: офіційний веб-сайт. URL: <https://www.ipinfusion.com/resources/fiber-to-the-premises-pondering-the-details/> (дата звернення: 20.03.2026).
16. GPON (Gigabit Passive Optical Network). Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/GPON> (дата звернення: 20.03.2026).
17. GPON Frame Structure. ResearchGate: офіційний веб-сайт. URL: https://www.researchgate.net/figure/GPON-Frame-Structure_fig1_336886673.
18. Unveiling the Power of GPON in Modern FTTH Networks. URL: <https://www.fs.com/blog/unveiling-the-power-of-gpon-in-modern-ftth-networks-4351.html> (дата звернення: 20.03.2026).
19. GPON Explained: What Is Gigabit Passive Optical Network? URL: <https://www.vsolcn.com/blog/what-is-gpon-gpon-networks.html> (дата звернення: 20.03.2026).

20. NG-PON2: Revolutionizing Fiber Optic Networks for a Hyper-Connected World. URL: <https://resources.l-p.com/knowledge-center/ng-pon2-fiber-optic-network-benefits-speed-capacity> (дата звернення: 20.03.2026).