ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Проект оптичної офісної комп'ютерної мережі»
на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Борис ТКАЧУК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)*

Виконав: здобувач вищої освіти
студент гр. ТСДМ-63
Борис ТКАЧУК
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: Сергій МАРКОВ
к.т.н., доцент *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Рецензент:
_____ _____
(науковий ступінь, вчене звання) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ткачуку Борису Генадійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Проект оптичної офісної комп'ютерної мережі
керівник кваліфікаційної роботи Сергій МАРКОВ, к.т.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від « 30 » жовтня 2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1) рекомендації міжнародної спілки електрозв'язку щодо комп'ютерних мереж;
2) відомості про сучасний стан оптичних мереж доступу (матеріали періодичних науково-технічних видань);
3) дані про особливості проектування, будівництва та експлуатації (вимірювання, тестування, пошук несправностей) пасивних оптичних мереж доступу;
4) вихідні дані про мережу, яку потрібне зпроектувати;
5) матеріали по оформленню пояснювальної записки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1) класифікація комп'ютерних мереж;
2) компоненти волоконнооптичної комп'ютерної мережі;
3) типи та стандарти пасивних оптичних мереж та їх характеристики;
4) технології оптичних мереж доступу;
5) технічне обгрунтування створення пасивної оптичної мережі;
6) проектні розрахунки (бюджет оптичної потужності та бюджет загасання);
7) розробка проектної документації;
8) охорона праці;

9) економічні характеристики проекту.

5. Перелік графічного матеріалу: ___презентація на___слайдах_____

6. Дата видачі завдання «_01_» _жовтня_ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд технологій доступу	05.10.2025	
2	Огляд типів пасивних оптичних мереж	10.10.2025	
3	Стандарти пасивних оптичних мереж та їх характеристики	15.10.2025	
4	Технічне обгрунтування створення пасивної оптичної мережі містечка	30.10.2025	
5	Проектні розрахунки (бюджет оптичної потужності та бюджет загасання)	15.11.2025	
6	Розробка проектної документації	10.12.2025	
7	Оформлення роботи та презентації	25.12.2025	

Здобувач вищої освіти _____ Борис ТКАЧУК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник роботи _____ Сергій МАРКОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: стор., рис., табл., джерел.

Мета роботи – аналіз технологій проектування комп'ютерних мереж з використанням сучасних волоконно-оптичних технологій, методів їх розрахунку, створення проектної документації для комп'ютерної мережі, в якою середовищем передачі є оптичні волокна.

Об'єкт дослідження – комп'ютерні оптичні мережі.

Предмет дослідження – технології проектування комп'ютерних мереж на основі оптоволоконних технологій, методи їх розрахунку.

Короткий зміст роботи: У роботі проведений аналіз компонентів типів сучасних комп'ютерних мереж, які побудовані за оптичними технологіями; проведене порівняння характеристик оптичних мереж доступу різного типу, розроблена проектна документація на організацію та будівництво пасивної оптичної комп'ютерної мережі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОМП'ЮТЕРНА ОПТИЧНА МЕРЕЖА, ПРОЕКТ ПАСИВНОЇ ОПТИЧНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ, ЕКСПЛУАТАЦІЯ ОПТИЧНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: pages, pictures, table, sources.

The purpose of the work is the analysis of computer network design technologies using modern fiber-optic technologies, their calculation methods, creation of project documentation for a computer network in which optical fibers are the transmission medium.

The object of research is computer optical networks.

The subject of research is computer network design technologies based on optical fiber technologies, their calculation methods.

Summary of the work: The work analyzes the components of the types of modern computer networks that are built using optical technologies; a comparison of the characteristics of optical access networks of various types was carried out, project documentation was developed for the organization and construction of a passive optical computer network.

KEY WORDS: COMPUTER OPTICAL NETWORK, PASSIVE OPTICAL COMPUTER NETWORK PROJECT, OPTICAL COMPUTER NETWORK OPERATION.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Ткачук Б. Г. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: « Проект оптичної офісної комп'ютерної мережі».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Ткачук Б.Г. під час написання роботи проявив себе як вдумливий та допитливий фахівець, показав гарну теоретичну підготовку. За короткий час їм було опрацьовано значну кількість літератури з проблем проектування пасивних оптичних комп'ютерних мереж доступу та проведені необхідні розрахунки. Працюючи над завданнями, які доручалися керівником роботи, студент проявив ініціативу творчість і спроможність до інженерної праці.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Ткачука Б.Г. на оцінку « відмінно » та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник роботи _____ Сергій МАРКОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Ткачук Б.Г. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього рівня магістра

здобувача вищої освіти Ткачука Бориса Генадійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Проект оптичної офісної комп'ютерної мережі»

Актуальність.
Сучасні комп'ютерні мережі потребують високошвидкісні лінії для зв'язку між комп'ютерами мережі та доступу в глобальну мережу. Такими лініями є, в основному, волоконно-оптичні лінії. Вибір технології доступу по оптичним лініям, проектування мережі доступу є дуже важливими та актуальними задачами операторів, тому тема, обрана для розробки безумовно є актуальною.

Позитивні сторони.
Вирішені всі задачі, що поставлені в завданні на розробку, а саме: проведений аналіз стандартів технологій оптичного доступу, показані переваги технології GPON для мереж доступу, проведений аналіз пасивних оптичних мереж доступу. Розроблений проект офісної комп'ютерної мережі, проведена економічна оцінка проекту. Всі розділи роботи виконані на високому рівні. Пояснювальна записка написана чітко і зрозуміло, графічна частина оформлена з використанням комп'ютера, основні розрахунки виконані також за допомогою засобів обчислювальної техніки.

Недоліки.
1. Питання експлуатації мережі розглянуті поверхнево.
2. Не проведена оцінка застосування багатомодових волокон для мережі..

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи.

Висновок: *кваліфікаційна магістерська робота заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Ткачук Б.Г. заслуговує присвоєння кваліфікації: Магістр з електронний комунікацій та радіотехніки.*

Рецензент: _____ _____
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

_____
(науковий ступінь, вчене звання)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 7
ВСТУП 8
1 КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ, ЇХ ПОБУДОВА ТА КОМПОНЕНТИ 10
1.1 Основні поняття комп'ютерних мереж, вимоги до них 10
1.2 Основні компоненти комп'ютерних мереж 13
1.3 Концепції побудови мереж оптичного доступу 15
1.4 Топологія оптичних комп'ютерних мереж 17
2 ТЕХНОЛОГІЇ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ОПТИЧНОГО ДОСТУПУ 19
2.1 Організація двостороннього зв'язку в PON мережах 19
2.2 Технології GPON та EPON 22
2.3 Відмінність та подібність EPON і GPON, вибір технології 25
2.4 Технологія WDM PON 28
3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОНТАЖ МЕРЕЖІ 31
3.1 Вихідні дані, вибір OLT, топології та структура мережі 31
3.2 Трасировка волокон, ємність кабелю, резервування волокон 35
3.3 Розрахунок бюджету оптичної потужності та бюджету втрат 38
3.4 Монтаж мережі, її експлуатація та охорона праці 41
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 45
4.1 Розрахунок капітальних витрат 45
4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат 48
4.3 Порівняльний аналіз та економічні показники 50
ВИСНОВКИ 53
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 54
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (ПРЕЗЕНТАЦІЯ) 57

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КМ – комп’ютерна мережа

LAN – Local Area Network (локальна обчислювальна мережа)

WAN – Wide Area Network (глобальна мережа)

ОК – оптичний кабель

ОВ – оптичне волокно

PON – Passive Optical Network (пасивна оптична мережа)

GPON – Gigabit Passive Optical Network (гігабітна пасивна оптична мережа)

OLT – Optical Line Terminal (оптичний лінійний термінал)

ONT – Optical Network Terminal (оптичний мережевий термінал)

ODF – Optical Distribution Frame (оптична розподільна панель)

VLAN – Virtual Local Area Network (віртуальна локальна мережа)

QoS – Quality of Service (забезпечення якості обслуговування)

OSI – Open Systems Interconnection (еталонна модель взаємодії відкритих систем)

TCP/IP – Transmission Control Protocol / Internet Protocol (стек протоколів Інтернету)

ВСТУП

Сучасні офісні інформаційні системи потребують високошвидкісної, надійної та масштабованої мережної інфраструктури, здатної забезпечити роботу офісних застосунків, хмарних сервісів, IP-телефонії, відеоконференцій та систем відеоспостереження. Традиційні мідні рішення не завжди дозволяють забезпечити необхідну пропускну здатність і мають обмежений потенціал модернізації. Перспективним напрямом є використання пасивних оптичних мереж (PON), які забезпечують високі швидкості, енергоефективність та зниження експлуатаційних витрат [1, 2, 20, 21].

Об’єктом дослідження в магістерській роботі є офісна комп’ютерна мережа адміністративної будівлі. Предметом дослідження є структурні, технічні та економічні рішення з побудови оптичної офісної мережі на основі технології PON. Метою роботи є розробка проєкту оптичної офісної комп’ютерної мережі, яка забезпечує задані показники якості обслуговування та є економічно доцільною порівняно з мідною мережею [10, 11].

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. проаналізувати вимоги до сучасних офісних комп’ютерних мереж і базові принципи їх побудови;
2. дослідити архітектуру та особливості технології PON/GPON і можливості її застосування в офісних мережах [1, 2, 20, 21];
3. розробити структурну схему оптичної офісної мережі для заданого об’єкта, виконати вибір обладнання та трасування ліній;
4. розрахувати бюджет оптичної потужності та перевірити працездатність проєкту;
5. оцінити капітальні та експлуатаційні витрати, порівняти оптичний варіант із мідним та визначити основні економічні показники ефективності.

У роботі використано методи аналізу літературних джерел і стандартів, розрахункові методи для визначення параметрів оптичних ліній і техніко-економічні методи оцінки (розрахунок витрат, питомих показників, строку окупності). Практична значущість роботи полягає в можливості застосування отриманих результатів під час проєктування та модернізації офісних мереж у подібних будівлях. Структура роботи включає вступ, чотири розділи, висновки, перелік посилань та додатки.

1 КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ, ЇХ ПОБУДОВА ТА КОМПОНЕНТИ

1.1 Основні поняття комп'ютерних мереж, вимоги до них

Комп'ютерна мережа – це сукупність взаємопов'язаних технічних і програмних засобів, призначених для обміну даними між комп'ютерами, серверами, мережевими пристроями і користувачами. До складу мережі входять кінцеві пристрої (робочі станції, сервери, принтери, IP-телефони), мережеве обладнання (комутатори, маршрутизатори, точки доступу, оптичні лінійні термінали), а також середовище передавання даних, яким можуть бути мідні кабелі, радіоканали або оптичні волокна [10, 11].

За територіальним охопленням комп'ютерні мережі поділяють на локальні LAN, міські MAN та глобальні WAN [10, 11].

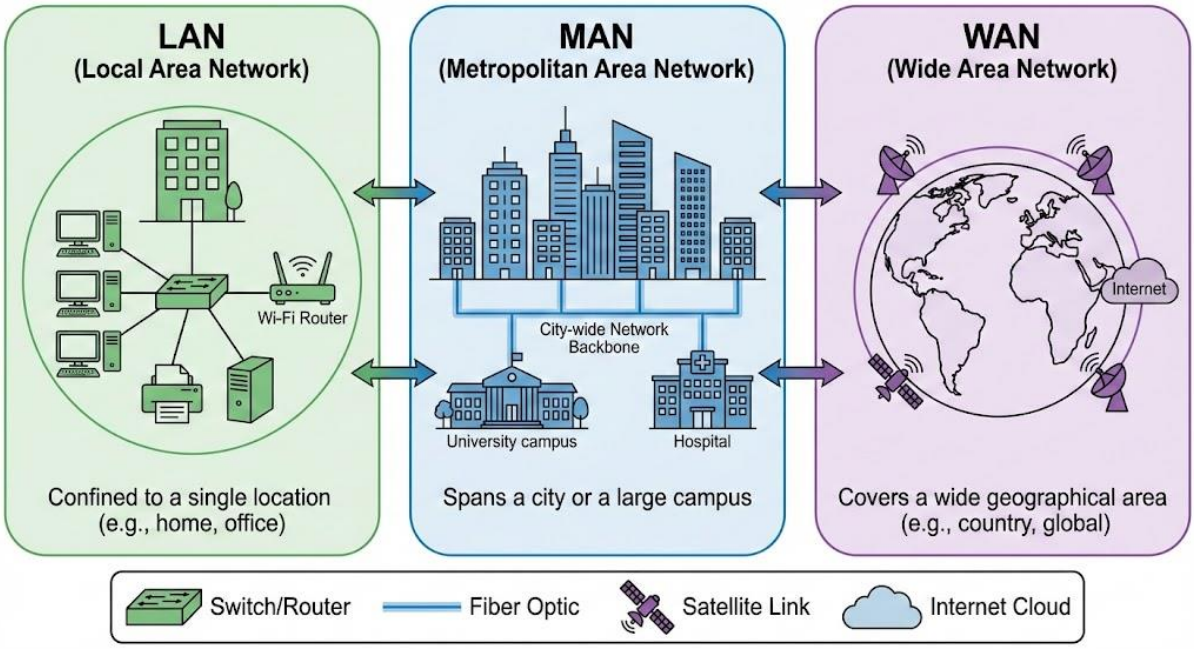


Рис. 1.1 Типи комп'ютерних мереж за територіальним охопленням

Локальна мережа зазвичай обмежена однією будівлею або групою близько розташованих будівель і призначена для забезпечення швидкого обміну даними всередині організації. Міські та глобальні мережі охоплюють значні території і

використовуються для взаємодії між віддаленими підрозділами, підключення до ресурсів інтернету, організації корпоративних VPN [10, 11].

З погляду логічної організації розрізняють однорангові мережі, де всі вузли мають приблизно однакові функції, та мережі з виділеними серверами, у яких частина пристроїв виконує спеціалізовані функції з надання сервісів іншим учасникам мережі. В офісних умовах переважають ієрархічні клієнт-серверні структури, де сервери надають сервіси зберігання даних, автентифікації користувачів, електронної пошти, доступу до баз даних тощо.

З позицій методів пересилання інформації мережі можуть використовувати комутацію каналів, комутацію пакетів або їх комбінацію. У сучасних комп'ютерних мережах домінує пакетна передача даних, що забезпечує ефективне використання пропускної здатності та можливість реалізації різноманітних сервісів поверх єдиної транспортної інфраструктури.

Для опису взаємодії протоколів і служб різних рівнів використовується еталонна модель OSI, яка виділяє сім рівнів: фізичний, канальний, мережевий, транспортний, сеансовий, представницький та прикладний. У практичних реалізаціях широко застосовується стек протоколів TCP/IP, де логічні функції об'єднуються у чотири рівні і забезпечують роботу глобальної мережі Інтернет і більшості корпоративних мереж [10, 11].

До офісної комп'ютерної мережі висувається комплекс вимог, зумовлених характером виконуваних завдань. Серед основних вимог можна виділити такі.

Пропускна здатність і швидкодія. Мережа повинна забезпечувати необхідні швидкості передавання даних для роботи офісних додатків, доступу до баз даних, відеоконференцій, хмарних сервісів. Оптичні технології дозволяють досягати швидкостей у гігабітному і багатогігабітному діапазоні на абонентському рівні, що створює запас можливостей на майбутнє.

Надійність і відмовостійкість. Важливо забезпечити мінімальний час простою сервісів, можливість резервування ключових елементів мережі, дублювання

магістральних каналів, використання високонадійного обладнання. Оптичні лінії мають підвищену стійкість до зовнішніх впливів, але вимагають правильного монтажу та захисту від механічних пошкоджень.

Масштабованість. Мережа повинна мати запас по кількості портів і можливість подальшого розширення без повної заміни інфраструктури. При використанні оптичних технологій масштабованість досягається завдяки застосуванню розгалужувачів, модульних OLT та можливості підключення нових абонентських пристроїв ONT і ONU.

Якість обслуговування. Для низки сервісів, таких як IP-телефонія, відеоконференції, системи реального часу, важливо забезпечити передбачувані затримки, малий рівень втрат пакетів, гарантовану пропускну здатність. Це досягається за допомогою механізмів QoS, пріоритезації трафіку, розмежування логічних мереж VLAN [10, 11].

Безпека. Офісна мережа обробляє конфіденційну інформацію, тому необхідно застосовувати засоби авторизації та автентифікації користувачів, міжмережеві екрани, системи виявлення вторгнень, шифрування даних, а також фізичний захист комутаційних і серверних приміщень. Оптичні канали дають додаткову перевагу, оскільки пасивне зняття інформації з волокна є значно складнішим, ніж з мідної лінії.

Керованість і обслуговування. Важливо мати централізовані засоби моніторингу стану мережі, віддаленого керування обладнанням та оперативної локалізації несправностей. У сучасних системах PON це реалізується за допомогою програмних платформ управління, що дозволяють контролювати як OLT, так і абонентські термінали [1, 2, 20, 21].

Енергоефективність та економічність. Мережа повинна забезпечувати задані технічні характеристики при мінімально можливих витратах на обладнання, прокладання кабелів, електроживлення та подальшу експлуатацію. Перевага пасивних оптичних мереж полягає в тому, що між центральним вузлом і абонентом

використовується пасивна інфраструктура, яка не потребує живлення в проміжних точках [1, 2, 20, 21].

1.2 Основні компоненти комп’ютерних мереж

До складу будь-якої комп’ютерної мережі входить набір взаємопов’язаних компонентів, кожен з яких виконує свою функцію в процесі передавання, оброблення та зберігання інформації. Для оптичних офісних мереж доцільно виділити такі основні групи компонентів.

Кінцеві пристрої.

Кінцевими пристроями є персональні комп’ютери, ноутбуки, тонкі клієнти, робочі станції, сервери застосунків і баз даних, IP-телефони, мультимедійні термінали, мережеві принтери, сканери, відеокамери тощо. Вони оснащуються мережевими інтерфейсами Ethernet, здатними працювати на швидкості до 1 Гбіт/с або вище. У випадку оптичного підключення безпосередньо до робочого місця застосовуються мережеві адаптери з оптичними модулями або медіаконвертори, що перетворюють оптичний сигнал у електричний.

Мережеве комутаційне обладнання.

Основними елементами є комутатори різних рівнів і маршрутизатори. Комутатори другого рівня здійснюють пересилання кадрів на основі MAC-адрес, забезпечують сегментацію мережі, підтримку VLAN, базові механізми QoS. Комутатори третього рівня поєднують функції комутації і маршрутизації, дозволяють організувати логічний поділ офісної мережі на підмережі, будувати складніші схеми резервування. Маршрутизатори забезпечують взаємодію локальної мережі з зовнішніми мережами, організують доступ до інтернету, реалізують фільтрацію трафіку і VPN-з’єднання [10, 11].

У оптичних мережах важливу роль відіграють OLT, які встановлюються в центральному вузлі і відповідають за формування оптичних сигналів, керування розподілом пропускної здатності між абонентами, реалізацію протоколів PON. На абонентській стороні встановлюються ONT або ONU, що здійснюють перетворення

оптичного сигналу у електричні інтерфейси Ethernet, телефони або інтерфейси для відеосервісів [1, 2, 20, 21].

Кабельна інфраструктура.

Кабельна система офісної оптичної мережі включає оптичні кабелі ОК, в яких розміщуються одне або декілька оптичних волокон ОВ. Залежно від умов прокладання використовуються внутрішні, зовнішні, універсальні або спеціалізовані кабелі (наприклад, негорючі для прокладання у приміщеннях) [15, 16, 18].

У структурі кабельної системи виділяють магістральну частину між центральною кросовою та поверховими розподільчими пунктами, вертикальні і горизонтальні сегменти, а також абонентські відгалуження до робочих місць. Для розподілу кабелів використовуються оптичні розподільні шафи ОРШ, оптичні розподільні коробки ОРК та поверхові відгалужувачі ВП. У кінцевій точці підключення встановлюється оптична розетка абонентська ОРА.

Пасивні оптичні компоненти.

До пасивних компонентів належать оптичні розгалужувачі ОР, що ділять потік випромінювання на декілька напрямків відповідно до заданого коефіцієнта розгалуження, кроси та патч-панелі, де організується з’єднання окремих волокон, оптичні конектори, муфти, адаптери, а також захисні елементи. Якість пасивних компонентів суттєво впливає на загальний бюджет загасання лінії і надійність роботи мережі.

Програмне забезпечення і служби.

Окрім фізичних і канальних компонентів, важливою складовою мережі є програмні служби. До них належать системи керування доменом, служби каталогу користувачів, сервери DHCP і DNS, поштові та файлові сервери, системи резервного копіювання, засоби моніторингу та керування мережею. У оптичних мережах PON окремо використовуються програмні платформи для централізованого управління OLT і абонентськими терміналами, налаштування профілів доступу, контролю за використанням пропускної здатності [1, 2, 20, 21].

1.3 Концепції побудови мереж оптичного доступу

Мережі оптичного доступу призначені для підключення кінцевих користувачів до транспортної мережі оператора або до локального центру оброблення даних за допомогою оптичного волокна. Основна ідея полягає у використанні високої пропускної здатності і великої довжини регенераційної ділянки оптичної лінії для організації кількох абонентських підключень до одного оптичного вузла.

Загалом можна виділити дві концепції побудови мереж оптичного доступу.

Перша концепція базується на використанні активних оптичних мереж, де між центральним вузлом і абонентом застосовується проміжне активне обладнання (комутатори, мультиплексори), що потребує електроживлення і обслуговування. Такі мережі дозволяють гнучко керувати топологією, але вимагають більших капітальних витрат, складніші з точки зору резервування і можуть мати нижчу надійність через наявність додаткових активних елементів.

Друга концепція передбачає побудову пасивної оптичної мережі PON, де між OLT і абонентськими терміналами ONT/ONU розташовані лише пасивні розгалужувачі. Живлення подається тільки на кінцеві активні пристрої, а сам оптичний тракт складається з волокон і пасивних компонентів. Такий підхід зменшує витрати на обслуговування, підвищує надійність і спрощує структуру мережі [15, 16, 18].

Для офісного середовища концепція PON є привабливою завдяки можливості підключити значну кількість робочих місць до одного OLT, гнучко керувати виділенням пропускної здатності для різних груп користувачів, а також завдяки зручності централізованого керування з боку адміністратора мережі [1, 2, 20, 21].

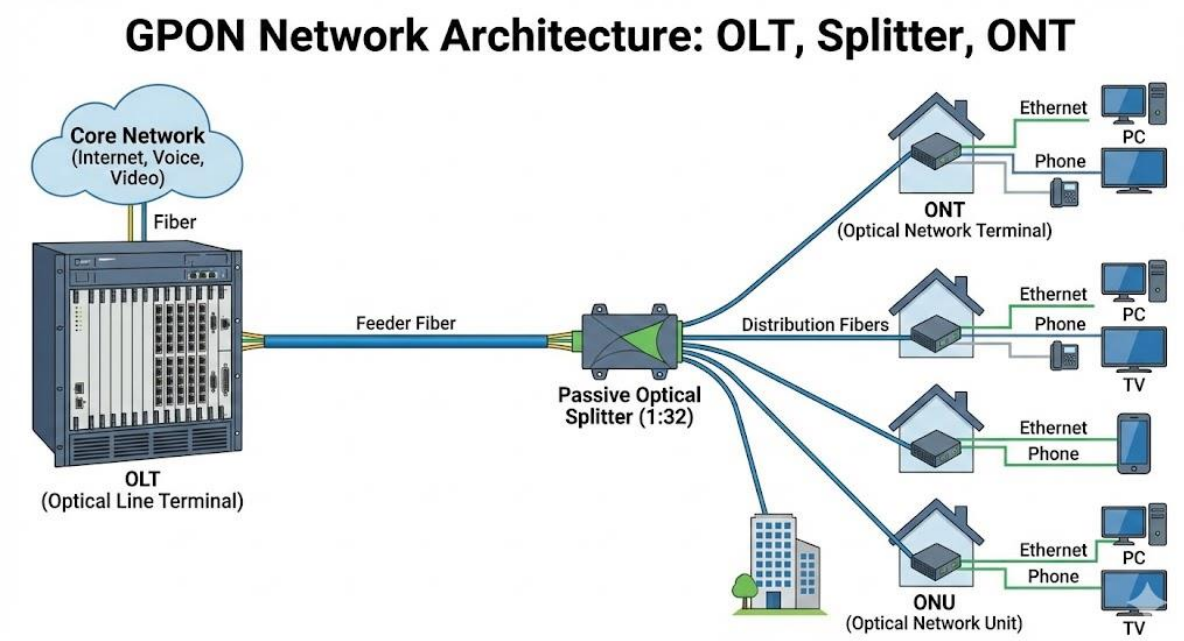


Рис. 1.2 Типова структура пасивної оптичної мережі доступу (PON)

Мережі оптичного доступу розрізняють також за схемою доведення волокна до абонента FTTx. У варіанті FTTO волокно доводиться безпосередньо до офісу або робочого місця, у FTTC – до вуличної шафи або розподільної точки поруч з будівлею, у FTTB – до будівлі з подальшим розподілом сигналу всередині будівлі іншими технологіями. Для проектованої оптичної офісної мережі пріоритетним є підхід, близький до FTTO або FTTB, коли волокно заводиться до офісного центру або безпосередньо до поверхових комутаційних вузлів [15, 17].

Важливим питанням є організація спільного використання ресурсу оптичної лінії між багатьма абонентами. У мережах PON застосовуються різні методи мультиплексування. Найпоширенішим способом є часовий поділ доступу, коли абоненти передають дані у різні часові вікна, сформовані OLT. Іншим варіантом є мультиплексування за довжиною хвилі WDM, коли кожному користувачу або групі користувачів відповідає своя довжина хвилі оптичного сигналу [1, 2, 20, 21].

Для офісних мереж важливим є не лише фізичний доступ, а й логічна організація сервісів. На основі оптичної інфраструктури реалізуються традиційні послуги

локальної мережі, IP-телефонія, відеоконференції, доступ до хмарних ресурсів, а також спеціалізовані корпоративні сервіси. Це вимагає від мережі оптичного доступу підтримки механізмів QoS, VLAN, можливості гнучкого налаштування профілів пропускної здатності для різних категорій користувачів (наприклад, штатні співробітники, гостьовий доступ, технічні служби) [10, 11].

1.4 Топологія оптичних комп'ютерних мереж

Топологія мережі визначає спосіб з'єднання її вузлів між собою і суттєво впливає на пропускну здатність, надійність і вартість побудови мережі. Для оптичних комп'ютерних мереж застосовуються класичні топології у поєднанні зі специфічними рішеннями, характерними для пасивних оптичних мереж [1, 2, 20, 21].

Серед базових топологій можна виділити наступні.

Топологія «зірка». У цій структурі всі вузли мережі підключаються до центрального комутаційного пристрою. В оптичному виконанні центральним вузлом може бути OLT або оптичний комутатор, від якого до поверхових або абонентських розподільчих пунктів прокладаються окремі оптичні волокна. Така топологія забезпечує простоту управління, добру ізоляцію між сегментами та зручність локалізації несправностей. Недоліком є необхідність великої кількості волокон від центральної точки до кожного вузла.

Топологія «дерево». У цьому випадку оптичні розгалужувачі формують ієрархічну структуру, де від одного магістрального волокна послідовно відгалужуються кілька гілок до різних груп абонентів. Деревоподібна структура характерна для PON і дозволяє оптимізувати використання волокон, зменшуючи кількість окремих магістральних ліній. Разом з тим, пошкодження волокна у верхніх рівнях дерева може призвести до відключення значної кількості абонентів, тому необхідно передбачати резервування критичних ділянок [1, 2, 20, 21].

Кільцева топологія. Кільце утворюється, коли вузли з'єднані так, що формують замкнений контур. У разі застосування оптичних кілець можливо реалізувати

автоматичне перемикання трафіку при обриві в одній з ділянок кільця, що підвищує відмовостійкість. У офісних мережах кільцева структура зазвичай використовується на магістральному рівні між будівлями або між основними комутаційними вузлами, тоді як внутрішня розводка реалізується у вигляді дерева або зірки.

Шинна топологія. Історично застосовувалась у перших локальних мережах з використанням коаксіального кабелю. У чистому вигляді в сучасних оптичних мережах практично не використовується, проте ідея послідовного підключення вузлів до спільної лінії частково присутня у деяких варіантах організації оптичних розгалужень.

У мережах PON найчастіше використовують топологію «дерево» з елементами зірки, коли від OLT до першого рівня розгалуження прокладається декілька магістральних волокон, а далі за допомогою оптичних спліттерів формується деревоподібна структура, що охоплює поверхові шафи і абонентські розетки. Така топологія дозволяє поєднати переваги централізованого управління із раціональним використанням кабельних ресурсів [1, 2, 20, 21].

Для офісної будівлі характерною є ієрархічна структура, де на верхньому рівні розташований центральний крос і обладнання OLT, на середньому – поверхові ОРШ з оптичними розгалужувачами, а на нижньому – абонентські ОРА і кінцеві пристрої. При цьому можлива організація резервних магістральних ліній між центральним вузлом і поверховими шафами, а також розділення різних служб на окремі логічні сегменти VLAN поверх єдиної оптичної інфраструктури [10, 11].

Вибір конкретної топології для проєктованої оптичної офісної комп’ютерної мережі визначатиметься планувальними особливостями будівлі, кількістю робочих місць, вимогами до резервування та економічними обмеженнями. У подальших розділах роботи буде обґрунтовано вибір структури мережі та наведено відповідні розрахунки параметрів оптичної лінії.

2 ТЕХНОЛОГІЇ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ ОПТИЧНОГО ДОСТУПУ

2.1 Організація двостороннього зв'язку в PON мережах

Двосторонній зв'язок між центральним вузлом і абонентами є ключовою особливістю PON. Потрібно забезпечити, з одного боку, ефективну передачу даних від мережі до всіх абонентів, з іншого боку – організувати контрольований доступ численних абонентських пристроїв до спільного висхідного каналу [1, 2, 20, 21].

Фізична організація каналу базується на використанні різних довжин хвиль для двох напрямків. Зазвичай для низхідного напрямку використовується одна довжина хвилі, а для висхідного – інша. У межах кожної довжини хвилі сигнали від різних абонентів розділяються в часі. Це дозволяє одночасно працювати центру і абонентам, при цьому сигнали не заважають один одному.

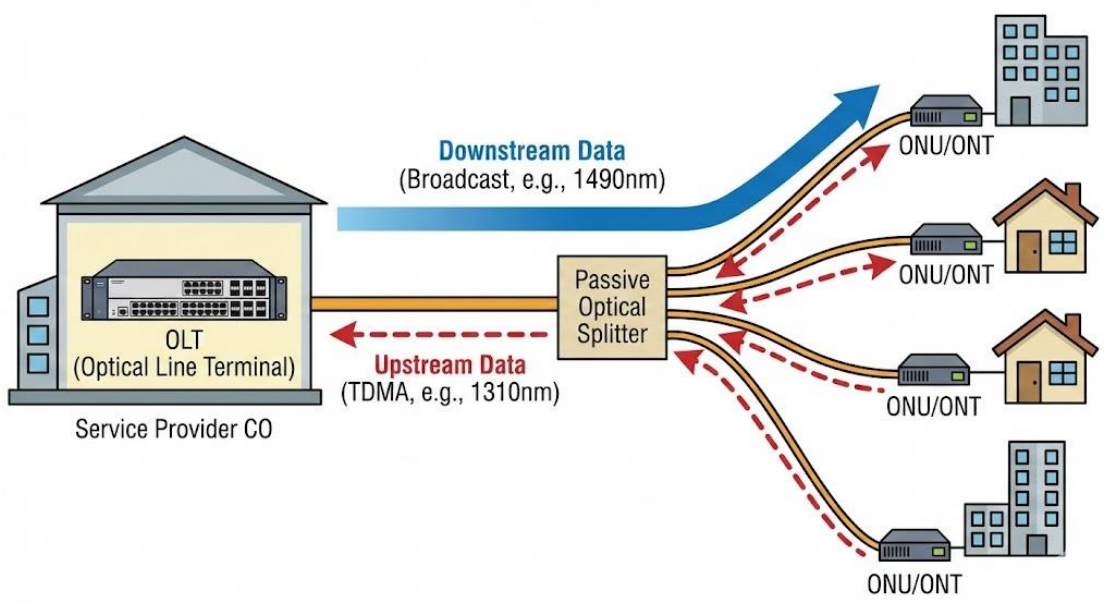


Рис. 2.1 Схема організації двостороннього зв'язку в PON-мережі

Низхідний напрямок (downstream) у PON мережі будується за принципом широкомовного потоку. Центральний вузол OLT формує єдиний потік даних, який містить кадри для всіх підключених абонентів. Цей потік безрозбірно надходить до всіх ONT/ONU через систему розгалужувачів. На стороні абонента термінал аналізує

службові поля кадрів, ідентифікатори абонентських портів та профілі, і відкидає все, що йому не адресовано. Таким чином, на фізичному рівні сигнал потрапляє до всіх, але на логічному рівні кожен користувач отримує лише власний трафік [1, 2, 20, 21].

Для офісного середовища такий підхід зручний тим, що OLT може централізовано формувати розподіл смуги пропускання, виділяючи певні частки пропускної здатності різним службам. Наприклад, для критичних бізнес-сервісів, таких як доступ до корпоративних баз даних, можна виділити гарантований мінімальний канал, тоді як для гостьового доступу до інтернету – канал з режимом найкращих зусиль.

Висхідний напрямок (upstream) організований складніше, оскільки багато абонентських пристроїв повинні ділити спільний фізичний ресурс. Якщо дозволити всім передавати одночасно, виникали б колізії та перекручення сигналів. Щоб цього уникнути, у PON застосовується механізм часової множинності, коли кожен ONT отримує своє часове вікно для передачі [1, 2, 20, 21].

Цей процес складається з кількох етапів:

– початкова реєстрація абонентського пристрою в мережі, під час якої ONT повідомляє OLT про свою наявність;

– процедура вимірювання відстані (ranging), в ході якої OLT визначає затримку сигналу до кожного ONT;

– призначення індивідуальних часових зсувів і розподіл часових слотів для передачі даних.

Ranging є важливим, тому що абоненти можуть знаходитися на різних відстанях від центрального вузла, і без корекції затримки їхні сигнали могли б приходити до OLT з перекриттям. Після визначення відстані до кожного абонента OLT коригує момент початку передачі для кожного ONT так, щоб імпульси приходили до приймача один за одним, а не одночасно.

У реальній експлуатації мережеве навантаження постійно змінюється: в один момент часу один користувач активно завантажує файли, в інший – кілька абонентів

ведуть відеоконференції, хтось майже не використовує канал. Тому в сучасних PON мережах застосовується динамічне виділення смуги пропускання. ONT періодично передає службову інформацію про стан своїх черг і про те, який обсяг даних очікує на відправлення. На основі цих даних OLT коригує розмір і частоту виділення часових слотів для кожного абонента [1, 2, 20, 21].

У моменти підвищеного навантаження ті абоненти, які активніше використовують мережу, можуть отримати більше часових ресурсів, а отже – більшу ефективну швидкість у висхідному напрямку. При цьому реалізуються механізми пріоритетів: важливі сервіси, наприклад, голос або трафік від критичних серверів, мають вищий пріоритет, ніж вторинні, такі як гостьовий доступ або несуттєві фонові завантаження.

Окремо слід зазначити реалізацію службових каналів управління. Паралельно з корисними даними в обох напрямках передаються службові повідомлення, за допомогою яких OLT може конфігурувати параметри ONT, змінювати профілі швидкостей, оновлювати програмне забезпечення, віддалено перезавантажувати пристрій у випадку некоректної роботи. Для адміністратора офісної мережі це означає, що більшість задач можна виконувати централізовано, без фізичного доступу до кожної абонентської точки.

Важливим компонентом організації двостороннього зв’язку є механізми захисту та шифрування. Оскільки у низхідному напрямку весь трафік фізично доходить до всіх абонентів, застосовується шифрування даних, щоб кожен ONT міг розшифрувати лише свою частину трафіку. Ключі шифрування прив’язуються до конкретних абонентських пристроїв, і навіть якщо стороння особа якось фізично підключить своє обладнання до оптичної лінії, вона не зможе прочитати передані дані без відповідних ключів.

З погляду фізичних параметрів, двосторонній зв’язок у PON обмежений бюджетом потужності та максимальною довжиною лінії. Під час проєктування потрібно враховувати загасання в оптичному волокні, втрати на кожному

розгалужувачі, у конекторах, муфтах, розетках. Центральний вузол і абонентські пристрої мають певний запас по потужності передавачів і чутливості приймачів. Якщо сумарні втрати перевищують допустимі, мережа працюватиме нестабільно або зв'язок буде відсутнім. Тому правильний розрахунок оптичного бюджету є обов'язковою частиною будь-якого PON-проєкту [1, 2, 20, 21].

Для офісної будівлі, де відстані відносно невеликі, а кількість рівнів розгалуження обмежена кількома ступенями, задача забезпечення двостороннього зв'язку у PON значно спрощується порівняно з доступовими мережами оператора, які можуть тягнутися на десятки кілометрів. Це дозволяє використовувати стандартизоване обладнання і типові розгалужувачі, не наближаючись до граничних значень бюджету потужності.

Підсумовуючи, організація двостороннього зв'язку у PON мережах базується на поєднанні чотирьох ключових ідей: розділення напрямків передачі за довжинами хвиль, широкомовного потоку в низхідному напрямку, керованого доступу за часом у висхідному, а також централізованого управління й шифрування даних. Саме завдяки цьому PON здатні забезпечити одночасний доступ великої кількості абонентів до оптичної лінії при збереженні керованості та безпеки.

2.2 Технології GPON та EPON

Усередині загальної концепції PON найбільш широке застосування отримали дві технології: GPON і EPON. Вони розвивалися паралельно, базуючись на різних підходах, але сьогодні обидві вважаються зрілими і широко підтримуються виробниками обладнання. Для проєктування оптичної офісної мережі важливо розуміти особливості кожної з них [1, 2, 20, 21].

Технологія GPON

GPON розроблялася як універсальне широкосмугове рішення, здатне одночасно передавати різні види трафіку. На фізичному рівні використовується оптичне волокно з поділом напрямків за довжинами хвиль, а також можливістю додаткової смуги для

відео. Стандартні реалізації передбачають гігабітні та багатогігабітні швидкості у низхідному та висхідному напрямках. Для офісного середовища таких швидкостей більш ніж достатньо, особливо якщо врахувати, що вони розподіляються між групою абонентів.

Однією з характерних рис GPON є власна система кадрування. Дані від різних сервісів формуються у спеціальні контейнери, які потім запаковуються в єдиний потік. Це дає можливість зручно керувати смугою пропускання: для голосового трафіку можна створити контейнери з гарантованою швидкістю, для відеосервісів – із пріоритетом, а для звичайних даних – з гнучким режимом. У результаті GPON добре підходить для сценаріїв, де одночасно працює багато різних сервісів.

На рівні управління GPON передбачає розвинуті можливості конфігурації. Адміністратор може налаштовувати профілі абонентів: швидкості в обох напрямках, дозволені типи сервісів, пріоритети трафіку, правила доступу до внутрішніх ресурсів. Для офісів це зручно, бо можна, наприклад, виділити один профіль для звичайних робочих станцій, інший – для серверів, третій – для систем відеоспостереження.

Ще однією перевагою GPON є високі типові коефіцієнти розгалуження. На один порт OLT можна підключити десятки абонентських терміналів через каскад пасивних спліттерів. Для провайдерів це означає можливість будувати мережі з великою кількістю кінцевих користувачів, а для офісів – можливість підключити цілий поверх або навіть будівлю до одного порту центрального вузла.

З офісної точки зору GPON дозволяє збудувати структуру, де вся внутрішня мережа підприємства базується на єдиній оптичній інфраструктурі. На верхньому рівні можна встановити OLT, до якого підключені всі поверхи, а далі, через ONT, організувати підключення до комутаторів доступу або безпосередньо до робочих місць. Така схема спрощує логіку управління і зменшує кількість активних пристроїв у проміжних точках [1, 2, 20, 21].

Технологія EPON

EPON пішла іншим шляхом і зробила ставку на максимально тісну інтеграцію з

Ethernet. Її ідея полягає в тому, щоб перенести звичну логіку Ethernet-мереж на оптичний рівень. У результаті для адміністраторів, які добре знайомі з Ethernet, EPON виглядає більш інтуїтивною.

Основна відмінність EPON від GPON – це тип кадру. У EPON використовується стандартний Ethernet кадр. Це означає, що дані від кінцевих пристроїв практично без перетворень транспортуються по оптичному каналу. На практиці це зменшує кількість проміжних перетворень, що може позитивно впливати на затримки і спрощує реалізацію різних мережевих функцій, таких як VLAN, пріоритезація, маркування трафіку [10, 11].

Завдяки тому, що EPON ґрунтується на стандарті Ethernet, обладнання різних виробників легше інтегрується одне з одним. Багато комутаторів, маршрутизаторів і систем керування підтримують стандартизовані протоколи, тому перехід до EPON для багатьох операторів і корпоративних користувачів виглядає логічним продовженням вже наявних Ethernet-рішень.

Типові реалізації EPON забезпечують симетричні швидкості в обох напрямках або близькі до симетричних. Для офісів, де користувачі не лише завантажують дані, але й активно висилають файли, проводять відеоконференції, працюють з хмарними сервісами, це може бути додатковою перевагою.

Як і у GPON, в EPON існує механізм розподілу висхідного каналу між абонентами. Проте управління цим процесом організоване через спеціальні повідомлення, узгоджені з логікою Ethernet. Це полегшує реалізацію механізмів управління пропускною здатністю на обладнанні, де вже є підтримка різних Ethernet-функцій [1, 2, 20, 21].

EPON добре підходить для корпоративних мереж, де вже існує розгалужена Ethernet-інфраструктура. У такому випадку перехід на EPON дозволяє розширити оптичний сегмент мережі без суттєвої зміни підходів до адміністрування: ті ж самі принципи VLAN, QoS, політик доступу можуть застосовуватися як у мідному, так і в оптичному сегменті [10, 11].

Підсумовуючи, і GPON, і EPON забезпечують побудову пасивної оптичної мережі за схемою точка багато точок і дозволяють підключати багато абонентів до одного OLT. Вибір між ними залежить від того, що важливіше саме для конкретної організації: універсальність і чітка підтримка різних видів трафіку (GPON) чи максимальна сумісність з Ethernet і, як правило, простіша інтеграція з існуючою інфраструктурою (EPON) [15, 16, 18].

2.3 Відмінність та подібність EPON і GPON, вибір технології

Щоб зробити обґрунтований вибір технології для проєктування оптичної офісної мережі, необхідно порівняти EPON і GPON за кількома ключовими критеріями.

По перше, це структура кадру і спосіб опрацювання трафіку. GPON використовує власну складнішу схему інкапсуляції. Це дає можливість досить гнучко керувати різними типами сервісів, виділяти для них окремі логічні канали, а також забезпечувати більш чіткий контроль за виділенням смуги пропускання. EPON натомість працює зі стандартними Ethernet кадрами, що робить логіку роботи мережі прозорішою для адміністратора, який звик до класичних локальних мереж.

По друге, важливим є співвідношення швидкостей у низхідному і висхідному напрямках. У багатьох конфігураціях GPON швидкість до абонента вища, ніж від абонента. Така асиметрія добре відповідає моделі типового користувача, який більше отримує дані, ніж відправляє. Для EPON характерні симетричні або майже симетричні швидкості. Це може бути важливим для офісів, де співробітники передають великі обсяги даних у хмарні сервіси, ведуть відеоконференції або активно користуються віддаленими робочими столами.

По третє, звертають увагу на ефективність використання смуги пропускання. Вважається, що в деяких сценаріях GPON дозволяє досягти трохи вищої ефективності за рахунок своєї структури кадрування, тоді як EPON має дещо більші накладні витрати через заголовки Ethernet. Однак у практичних офісних умовах ця різниця, як

правило, не є критичною, особливо з урахуванням того, що загальна смуга пропускання все одно залишається дуже великою щодо реальних потреб офісу.

По четверте, враховується доступність обладнання і його вартість. На ринку представлено багато рішень як для GPON, так і для EPON. У деяких регіонах технологія GPON отримала ширшу підтримку операторів зв'язку, у інших – EPON. Це впливає на кінцеву вартість проєкту: там, де певна технологія більш поширена, легше знайти підрядників з досвідом, а також ширший вибір сумісного обладнання від різних виробників.

По п'яте, слід оцінити простоту адміністрування. Для інженерів, які мають великий досвід роботи з Ethernet, технологія EPON виглядає більш природною, оскільки не вимагає глибокого занурення в специфічні механізми інкапсуляції. З іншого боку, GPON надає дуже гнучкі інструменти управління, які при належній підготовці адміністратора дозволяють тонко налаштовувати мережу під конкретні завдання [1, 2, 20, 21].

Для офісної комп'ютерної мережі, яка розглядається у цій магістерській роботі, можна сформулювати основні вимоги до технології оптичного доступу:

– можливість підключення достатньої кількості робочих місць до одного центрального вузла без перевантаження мережі;

– підтримка одночасної роботи декількох типів сервісів (дані, голос, відеоспостереження, гостьовий доступ);

– запас пропускної здатності на перспективу, щоб не довелося повністю змінювати фізичну інфраструктуру при зростанні навантаження;

– наявність на ринку обладнання, сумісного між собою, та можливість його обслуговування;

– зрозумілий механізм управління, що дозволяє швидко впроваджувати зміни у профілях доступу, додавати нових абонентів, аналізувати завантаження.

З урахуванням цих критеріїв у межах проєкту раціонально зупинитися на технології GPON як на базовій. Це обґрунтовується такими міркуваннями.

По перше, GPON із самого початку орієнтувалася на комплексне надання різних видів послуг, тому механізми пріоритезації та керування якістю обслуговування в ній розвинуті. Для офісу, де одночасно працюють критичні та менш важливі сервіси, це дозволяє правильно розставити пріоритети.

По друге, можливість гнучко керувати профілями абонентів дає змогу налаштувати окремі параметри для різних підрозділів підприємства. Наприклад, відділ бухгалтерії може мати один набір обмежень і гарантій, відділ розробки – інший, служба безпеки – третій.

По третє, широке поширення GPON обладнання на ринку полегшує пошук сумісних рішень та технічної підтримки. Багато виробників випускають OLT і ONT, які підтримують стандартні механізми управління, що дозволяє в майбутньому модернізувати мережу без повної заміни всієї лінійки пристроїв.

Водночас EPON не відкидається як безперспективна технологія. Вона розглядається як альтернативний варіант, який може бути доцільним у випадках, коли у замовника вже є великий досвід експлуатації масштабних Ethernet-мереж і є вимога на симетричність каналів. У даній роботі EPON аналізується для кращого розуміння загальної картини і порівняння сильних та слабких сторін обраної технології.

Розглянуто технології GPON та EPON, їх основні параметри та сфери застосування. Проведено порівняльний аналіз стандартів з точки зору пропускної здатності, ефективності використання смуги пропускання, підтримки служб якості обслуговування, сумісності з існуючими IP-мережами. На основі аналізу відмінностей і подібностей EPON та GPON обґрунтовано вибір технології доступу для розроблюваного офісного проекту [1, 2, 20, 21].

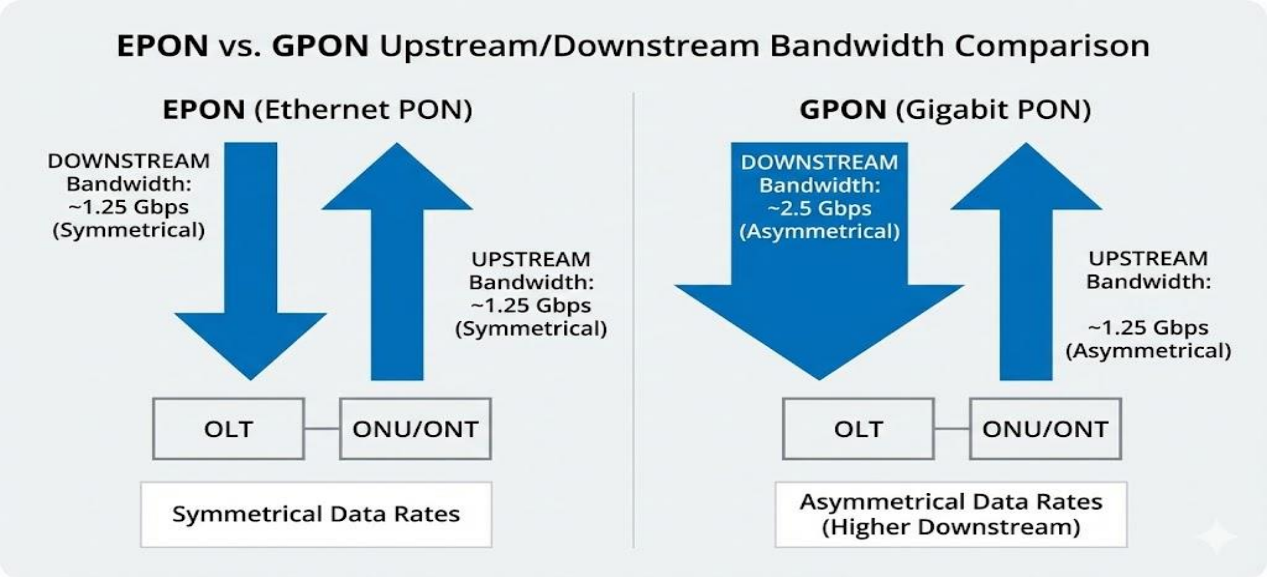


Рис. 2.2 Порівняння основних характеристик технологій EPON та GPON

2.4 Технологія WDM PON

Окремим напрямком розвитку пасивних оптичних мереж є застосування мультиплексування за довжиною хвилі. Технологія WDM PON поєднує в собі ідею пасивної мережі з можливістю одночасного використання багатьох оптичних каналів на різних довжинах хвиль у межах одного волокна.

Суть підходу полягає в тому, що замість того, щоб усі абоненти ділили один і той самий спектральний канал, кожному з них (або невеликій групі) призначається своя довжина хвилі. На стороні OLT використовується набір лазерів або джерел, які генерують сигнали на різних довжинах хвиль. Далі ці сигнали об’єднуються у єдиний оптичний потік і через пасивні елементи надходять у волокно.

У пасивній частині мережі застосовуються спеціальні пристрої, які розділяють або об’єднують сигнали за довжиною хвилі. На відміну від звичайних спліттерів, які розподіляють потужність сигналу, незалежно від його спектрального складу, такі елементи працюють як спектральні фільтри: певну довжину хвилі вони направляють в один вихід, іншу – в інший. На абонентському боці ONT оснащується приймачем і передавачем, налаштованими на конкретну довжину хвилі.

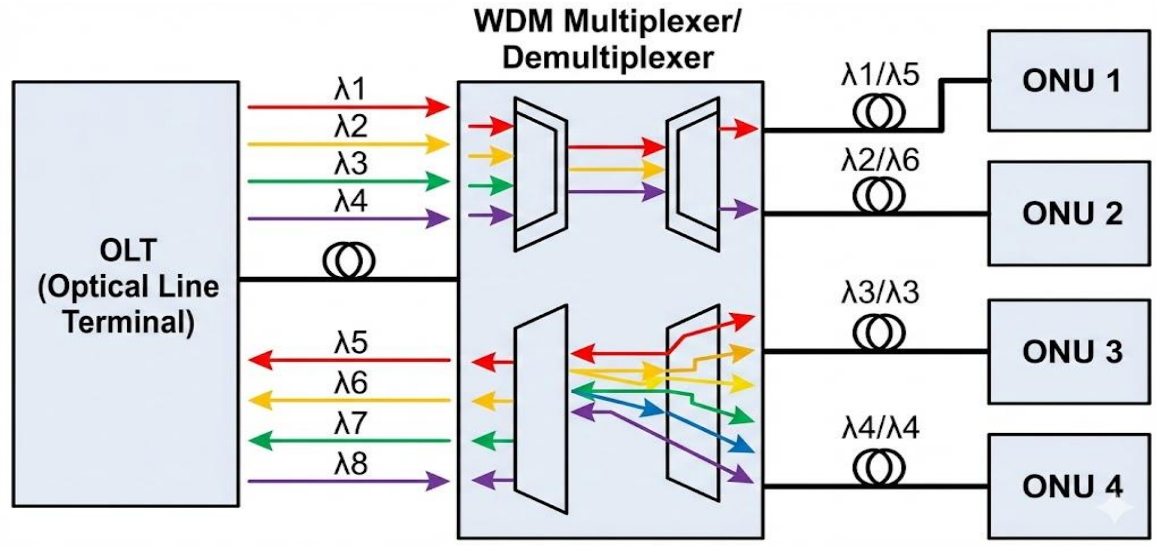


Рис. 2.3 Структурна схема мережі WDM PON з розподілом каналів за довжиною хвилі

Це дозволяє створити логічно незалежні канали, які майже не впливають один на одного. З точки зору абонента, він отримує свій окремий оптичний канал, яким не потрібно ділитися з іншими. На практиці це може означати, що немає потреби в складних алгоритмах динамічного розподілу часових слотів між різними ONT, оскільки кожен абонент працює у власному спектральному діапазоні.

Переваги WDM PON полягають у наступному [1, 2, 20, 21].

По перше, це дуже великий сумарний обсяг пропускної здатності. Якщо в класичній PON весь трафік усіх абонентів передається в межах одного каналу, то у WDM PON кожен канал може бути повноцінним гігабітним або багатогігабітним потоком, а сумарна пропускна здатність по одному волокну множиться на кількість довжин хвиль.

По друге, WDM PON забезпечує високий рівень ізоляції між абонентами. Оскільки вони працюють на різних довжинах хвиль, то не спостерігають чужий трафік навіть на фізичному рівні. Це підвищує конфіденційність та спрощує реалізацію політик безпеки.

По третє, така мережа добре масштабується. Якщо з часом виникає потреба підключити більше абонентів або збільшити пропускну здатність, можна додати ще

декілька довжин хвиль, не змінюючи прокладене волокно. Це особливо актуально там, де прокладання нових кабелів складне або дороге, наприклад, у щільно забудованих міських районах.

Однак переваги WDM PON мають зворотний бік у вигляді підвищеної складності та вартості. Лазерні джерела, що працюють на фіксованих або тунельованих довжинах хвиль, дорожчі, ніж звичайні. Спектрально-селективні пасивні елементи також складніші й дорожчі у виробництві. Крім того, виникають додаткові вимоги до точності налаштування, стабільності температурного режиму, діагностики. Для офісної мережі з обмеженою кількістю абонентів та відносно невеликими вимогами до сумарної пропускної здатності повноцінна WDM PON часто є надмірним рішенням.

У контексті магістерської роботи проєкт оптичної офісної мережі орієнтується на використання більш простих і поширених технологій, таких як GPON. Однак розуміння принципів WDM PON важливе, оскільки воно демонструє, у якому напрямку можуть розвиватися оптичні мережі в майбутньому [15, 16, 18].

Можна уявити ситуацію, коли офісна мережа, спроєктована на основі GPON, через кілька років зіштовхнеться з суттєвим зростанням навантаження. Наприклад, компанія значно розшириться, з’являться ресурсоємні сервіси, такі як потокове відео високої якості, віртуальна чи доповнена реальність, масивні системи аналізу даних. У цьому випадку збереження існуючої кабельної інфраструктури і перехід на рішення з елементами WDM можуть стати вигідною стратегією.

WDM PON у роботі розглядається як перспективна технологія, яка може бути цікавою для подальшої модернізації оптичних мереж. На етапі первинного проєктування офісна мережа будується з урахуванням можливості майбутнього оновлення активного обладнання і, при необхідності, часткової заміни пасивних елементів, не зачіпаючи основну кабельну магістраль. Це відповідає ідеї побудови інфраструктури з запасом, коли оптичне волокно закладається “на виріст”, а конкретні технології доступу можуть змінюватися в залежності від вимог часу [1, 2, 20, 21].

3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОНТАЖ МЕРЕЖІ

3.1 Вихідні дані, вибір OLT, топології та структура мережі

Відповідно до завдання на магістерську кваліфікаційну роботу розробляється проєкт оптичної офісної комп'ютерної мережі на основі пасивної оптичної технології доступу. Структура третього розділу визначена завданням і передбачає вибір обладнання, визначення топології, трасування оптичних ліній, розрахунок бюджету потужності та опис монтажу й експлуатації мережі [9, 24].

Для подальшого проєктування необхідно задати вихідні дані щодо об'єкта. У роботі розглядається типова адміністративно-офісна будівля телекомунікаційної компанії. Будівля п'ятиповерхова, з приблизно однаковим плануванням поверхів. На кожному поверсі розташовані робочі кімнати співробітників, переговорні, допоміжні приміщення (комори, архів, кімната відпочинку), а також обладнання локальної мережі доступу (комутатори, точки бездротового доступу).

Для цілей проєкту приймаємо такі вихідні вимоги до мережі:

1. загальна кількість стаціонарних робочих місць персоналу – близько 150
2. середня кількість робочих місць на поверх – 25–35
3. у кожному робочому місці повинні бути передбачені підключення до корпоративної LAN, IP-телефонії та доступу до глобальної мережі [10, 11]
4. в будівлі встановлюється система відеоспостереження (кілька IP-камер на поверх), система контролю доступу та декілька точок Wi-Fi для мобільних пристроїв
5. у будівлі є виділене приміщення серверної (телекомунікаційної) кімнати, де розміщуються сервери, маршрутизатори, комутатори ядра та оптичний лінійний термінал OLT
6. передбачається можливість розширення мережі (збільшення кількості робочих місць приблизно на 20–30 %) без повної заміни кабельної інфраструктури.

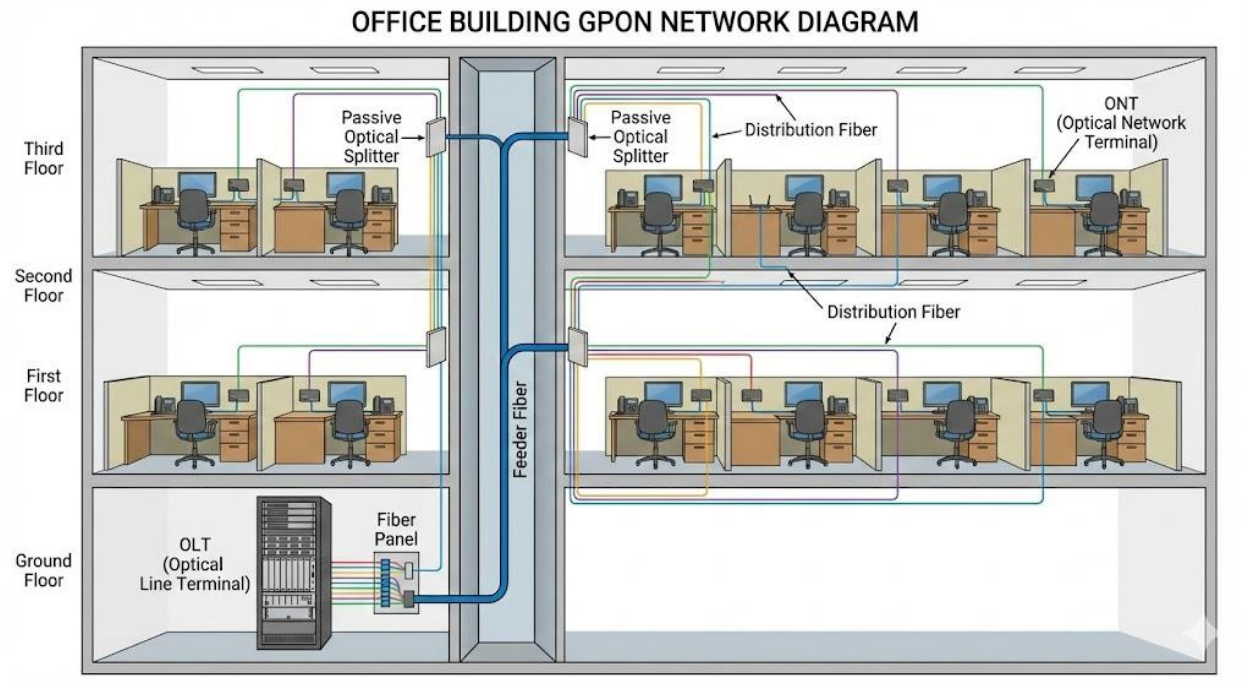


Рис. 3.1 Структурна схема оптичної офісної комп'ютерної мережі

Узагальнені вихідні дані щодо навантаження подані у вигляді таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Вимоги до мережі

Поверх	Кількість робочих місць	Кількість IP-телефонів	Кількість IP-камер	Кількість точок Wi-Fi
1	30	30	4	3
2	30	30	4	3
3	30	30	4	3
4	30	30	4	3
5	30	30	4	3

Для кожного робочого місця приймаємо орієнтовну необхідну смугу пропускання на рівні 50–100 Мбіт/с для службових задач (робота в корпоративних системах, електронна пошта, хмарні сервіси, відеоконференції). Для IP-камер високої чіткості потрібно приблизно 4–8 Мбіт/с на канал у залежності від налаштувань кодека та частоти кадрів. Для точок Wi-Fi закладається запас по пропускній здатності, оскільки кількість одночасно активних користувачів може змінюватися.

З урахуванням аналізу, проведеного в попередньому розділі, як базову технологію доступу для офісної мережі обрано GPON. Це дозволяє організувати оптичну мережу за схемою “точка – багато точок”, використовуючи один порт OLT для підключення групи абонентських терміналів ONT, що розташовані на поверхах та в окремих технологічних приміщеннях.

Вибір OLT здійснюється з урахуванням таких критеріїв:

1. підтримка технології GPON та відповідність рекомендаціям ITU щодо гігабітних пасивних оптичних мереж
2. достатня кількість GPON-портів для підключення всіх необхідних гілок мережі з запасом
3. наявність інтерфейсів підключення до існуючого мережевого ядра (Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Ethernet, можливість організувати резервні підключення)
4. підтримка механізмів якості обслуговування (QoS) для розділення службового, голосового, відео та гостьового трафіку
5. можливість централізованого управління абонентськими терміналами, ведення журналів, дистанційне оновлення програмного забезпечення.

Для проєкту доцільно обрати компактний модульний OLT з кількома GPON-портами, резервованими блоками живлення і можливістю нарощування кількості при подальшому розширенні мережі. Конкретна модель може бути обрана на етапі робочого проєктування з переліку обладнання, рекомендованого в методичних матеріалах, які враховуються у списку посилань до роботи [1, 2, 20, 21].

Топологія оптичної офісної мережі будується за ієрархічним принципом:

1. на верхньому рівні в серверній кімнаті розташовується OLT, маршрутизатор доступу до WAN та перша оптична розподільна панель ODF [10, 11]



Рис. 3.3 Приклад оптичної розподільної панелі (ODF) у серверній кімнаті

2. на другому рівні організовується вертикальна магістраль до поверхових шаф (ОРШ), де встановлюються оптичні розподільні коробки, розгалужувачі та, за необхідності, абонентські ONT для групових підключень

3. на третьому рівні виконується підключення робочих місць через оптичні розетки абонентські ОРА або через абонентські комутатори, які отримують трафік від ONT.

У межах будівлі доцільно використати комбіновану топологію: в магістралі між серверною та поверхами – деревоподібну структуру з центральною опорною точкою, а на рівні поверхів – зіркоподібну структуру від поверхового вузла до окремих абонентських точок. Це забезпечує простоту трасування кабелів, зрозумілу логіку обслуговування та можливість локалізувати несправності в межах окремої гілки.

Для кожного поверху формуються одна або кілька PON-гілок, що виходять від OLT через оптичні розгалужувачі. При проєктуванні співвідношення кількості абонентів до одного GPON-порту обирається з урахуванням вимог до пропускної здатності та допустимого коефіцієнта розгалуження. Наприклад, при використанні

розгалужувача 1×16 на кожній гілці можна підключити до 16 абонентських терміналів, що для офісного сценарію є цілком достатнім.

Підсумовуючи, у цьому підрозділі сформовано вихідні дані для проєктування, обґрунтовано вибір технології GPON, визначено загальну структуру мережі і принципову топологію “OLT – вертикальна магістраль – поверхові вузли – абонентські точки”. Це дозволяє перейти до деталізації трасування волокон, вибору ємності кабелів та проєктування резервування на наступному етапі [1, 2, 20, 21].

3.2 Трасировка волокон, ємність кабелю, резервування волокон

Трасування оптичних ліній в офісній будівлі є критичним етапом проєктування, оскільки від вибору маршрутів проходження кабелів, способу їх укладання та резервування залежить не лише працездатність мережі, а й зручність подальшої експлуатації та модернізації.

У даному проєкті передбачається, що в будівлі є технічні шахти (стояки), через які прокладаються комунікації між поверхами, а також кабельні лотки в коридорах та над підвісною стелею. Основні напрямки трасування такі:

1. від серверної кімнати до вертикального стояка, де розташовується первинний оптичний розподільний вузол
2. від стояка до поверхових оптичних розподільних шаф ОРШ
3. від ОРШ по коридорах до робочих кімнат з подальшим підведенням до оптичних розеток абонентських ОРА.

Для магістральних з’єднань між серверною та поверхами використовується однорежимний оптичний кабель підвищеної ємності (наприклад, 24 або 36 волокон). Це дає змогу організувати декілька PON-гілок, а також закласти резервні волокна на випадок аварійних ситуацій або подальшого розширення мережі.

Орієнтовний розподіл волокон у магістральному кабелі може мати такий вигляд, якій показаний в таблиці 3.ххх.

Навіть при повному завантаженні по 4 робочих волокна на поверх загальна кількість необхідних волокон становить 20, а при додаванні резерву по 2 волокна на кожен поверх – 30. У такій ситуації доцільним є вибір кабелю на 32 волокна, що забезпечить невеликий додатковий запас. (Див на таблиці 3.2)

Таблиця 3.2

Розподіл волокон у магістральному кабелі

Сегмент	Робочі волокна	Резервні волокна	Всього волокон
Серверна – 1 поверх (ОРШ1)	4	2	6
Серверна – 2 поверх (ОРШ2)	4	2	6
Серверна – 3 поверх (ОРШ3)	4	2	6
Серверна – 4 поверх (ОРШ4)	4	2	6
Серверна – 5 поверх (ОРШ5)	4	2	6

На поверховому рівні від ОРШ до абонентських точок прокладаються кабелі меншої ємності (2 або 4 волокна), що підключаються до оптичних розеток ОРА. У більшості випадків для PON-мережі достатньо одного волокна до абонента, оскільки передавання в обох напрямках здійснюється по одній нитці з поділом за довжинами хвиль. Друге волокно може використовуватися як резервне або для специфічних служб (наприклад, окремий канал для служб безпеки) [1, 2, 20, 21].

При виборі типу оптичного кабелю враховується місце його прокладання:

1. у вертикальних шахтах доцільно використовувати кабель, призначений для внутрішньо-будинкового монтажу, з негорючою оболонкою і можливістю кріплення у стояку

2. у горизонтальних ділянках (по коридорах, над підвісною стелею) застосовується легший кабель з малим радіусом вигину, який можна акуратно вкладати у лотки

3. у місцях підведення до робочих місць, де кабель проходить всередині приміщень, слід обирати кабель із підвищеними вимогами до пожежної безпеки і механічної міцності.

Трасування кабелів виконується таким чином, щоб:

1. мінімізувати кількість перетинів з силовими кабелями та іншими інженерними мережами

2. уникати зон з підвищеною вологістю або температурою

3. забезпечити дотримання мінімального радіусу вигину та допустимих механічних навантажень на кабель

4. передбачити можливість доступу до кабельних трас для подальшого обслуговування.

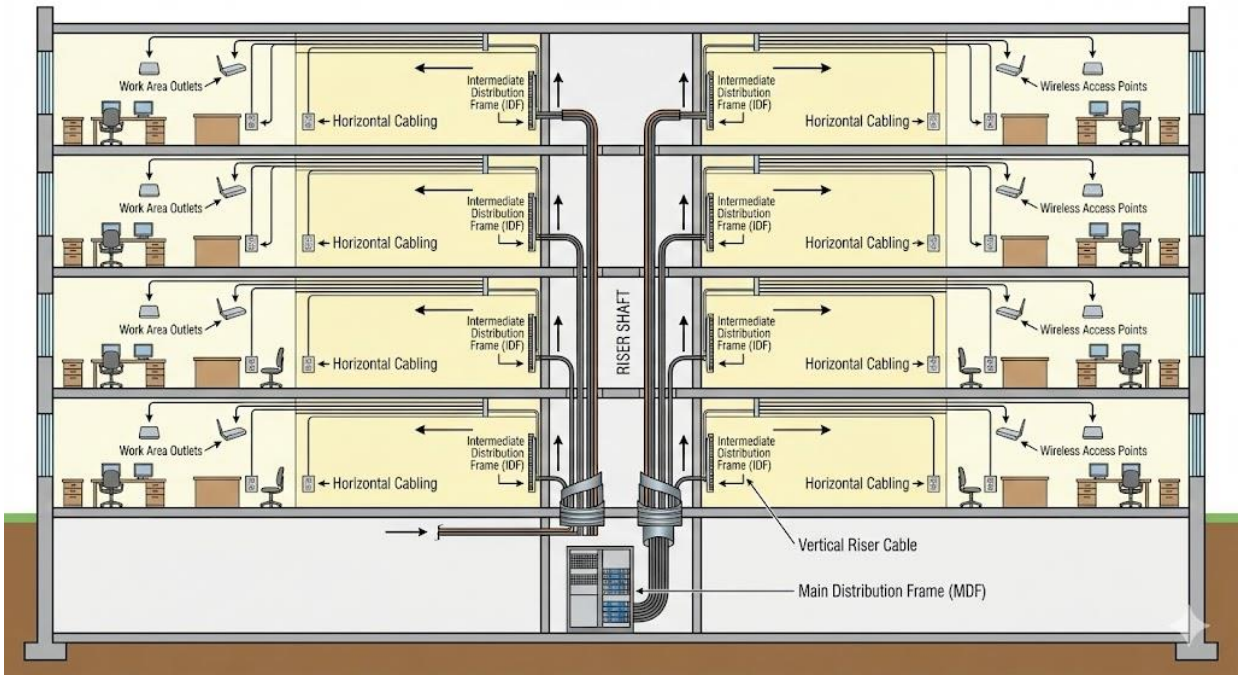


Рис. 3.2 Схема трасування магістральних та поверхових оптичних кабелів у будівлі

Серйозну увагу потрібно приділити резервуванню. У межах будівлі резервування реалізується двома основними способами:

1. резерв за рахунок додаткових волокон в основному кабелі (якщо виходить з ладу одне волокно, трафік може бути переведений на запасне)

2. резервування критичних сегментів за рахунок дублюючих кабельних трас, які прокладаються іншим шляхом (наприклад, обхід іншою частиною будівлі).

Другий варіант складніший з точки зору будівельно-монтажних робіт, але забезпечує більшу живучість мережі. Для офісної мережі середнього розміру

найчастіше достатньо резерву по волокнах, однак для підключення серверної або важливих технологічних систем доцільно передбачити дублюючу трасу.

У місцях розгалуження витримується логіка, визначена в попередньому підрозділі. Основний спліттер (наприклад, 1×4 або 1×8) може встановлюватися в серверній або у першій поверховій шафі. Далі, по необхідності, допускається каскадне розгалуження (наприклад, 1×4 у серверній та 1×4 на поверсі, що в сумі дає коефіцієнт розгалуження 1×16). При цьому важливо не виходити за межі допустимого бюджету оптичної потужності, який буде розрахований у підрозділі 3.3.

3.3 Розрахунок бюджету оптичної потужності та бюджету втрат

Бюджет оптичної потужності є одним з головних параметрів будь-якої оптичної лінії. Він показує, чи достатньо різниці між потужністю випромінювача на виході та чутливістю приймача для компенсації втрат на всіх елементах тракту. Якщо сумарні втрати перевищують допустимий бюджет, лінія працюватиме нестабільно або не працюватиме взагалі.

Загальний підхід до розрахунку такий:

1. задається типова оптична лінія “OLT – оптична розподільна панель – магістральний кабель – розгалужувачі – абонентський кабель – ONT”
2. задаються довжини окремих відрізків волокна
3. визначаються кількість і тип елементів, що вносять додаткові втрати (роз’єми, зварні з’єднання, розгалужувачі)
4. для кожного елемента встановлюється орієнтовне значення втрат у дБ, характерне для сучасних мереж доступу
5. за сумою цих складових визначається загальне загасання лінії
6. отримане значення порівнюється з бюджетом потужності, який задається класом обладнання (наприклад, GPON класу B+) [1, 2, 20, 21].

Сумарні втрати лінії можна уявити як суму:

$$A_{\text{лінії}} = A_{\text{волокна}} + A_{\text{роз}}\text{’ємів} + A_{\text{зварок}} + A_{\text{розгалужувачів}} + A_{\text{запас}}$$

де A_волокна – втрати в оптичному волокні, A_роз’ємів – втрати на роз’ємних з’єднаннях, A_зварок – втрати на зварювальних стиках, A_розгалужувачів – втрати на оптичних розгалужувачах, A_запас – технологічний запас, який закладається на старіння обладнання, можливі додаткові з’єднання та похибки вимірювання.

Для однорежимного волокна в діапазоні робочих довжин хвиль пасивних оптичних мереж можна прийняти такі орієнтовні значення:

1. питомі втрати в волокні – близько 0,35 дБ/км на довжині хвилі 1310 нм та близько 0,25 дБ/км на довжині хвилі 1490–1550 нм
2. втрати на одному роз’ємному з’єднанні – 0,2–0,5 дБ
3. втрати на одній зварці – 0,05–0,1 дБ при якісному монтажі
4. втрати на розгалужувачі залежать від коефіцієнта розгалуження (для 1×2 – близько 3,5 дБ, для 1×4 – 7–7,5 дБ, для 1×8 – 10–11 дБ, для 1×16 – 13–14 дБ, для 1×32 – 16–17 дБ).

Розглянемо типову гілку мережі від порту OLT до одного абонента на 4-му поверсі. Припустимо, що:

1. довжина магістрального відрізка від серверної до ОРШ4 – 60 м
2. довжина абонентського відрізка від ОРШ4 до робочого місця – 40 м
3. загальна довжина волокна в гілці (з урахуванням запасів у шафах і на панелях) – 120 м
4. використовується комбінована схема розгалуження: один розгалужувач 1×4 у серверній та один розгалужувач 1×4 на поверсі (загальний коефіцієнт 1×16)
5. кількість роз’ємних з’єднань у тракті – 6 (дві точки підключення на стороні OLT, дві – в поверховій шафі, одна – на оптичній розетці, одна – на стороні ONT)
6. кількість зварних з’єднань – 4 (зварювання магістрального кабелю, підключення до розгалужувача, підключення абонентського кабелю).

Тоді втрати в волокні становитимуть:

$A_{\text{волокна}} \approx 0{,}25\,\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \times 0{,}12\ \text{км} \approx 0{,}03\ \text{дБ}$ (в межах будівлі ця величина незначна, але її все одно враховують).

Втрати на роз'ємних з'єднаннях (приймемо 0,3 дБ на одне з'єднання):

$$A_{\text{роз'ємів}} \approx 6 \times 0{,}3\ \text{дБ} = 1{,}8\ \text{дБ}.$$

Втрати на зварках (приймемо 0,1 дБ на одну зварку):

$$A_{\text{зварок}} \approx 4 \times 0{,}1\ \text{дБ} = 0{,}4\ \text{дБ}.$$

Втрати на розгалужувачах (приймемо 7,2 дБ для 1×4 та 7,2 дБ для другого 1×4):

$$A_{\text{розгалужувачів}} \approx 7{,}2\ \text{дБ} + 7{,}2\ \text{дБ} = 14{,}4\ \text{дБ}.$$

Додатковий запас на старіння, можливі майбутні з'єднання і похибки вимірювання задаємо на рівні 3–4 дБ.

Тоді сумарні втрати:

$$A_{\text{лінії}} \approx 0{,}03 + 1{,}8 + 0{,}4 + 14{,}4 + 3 \approx 19{,}6\ \text{дБ}.$$

Для обладнання GPON класу B+ типовий бюджет оптичної потужності складає близько 28 дБ. Це означає, що лінія з розрахованими втратами має резерв близько 8–9 дБ, що є достатнім для надійної роботи мережі та невеликих змін конфігурації (наприклад, додавання кількох додаткових з'єднань або збільшення довжини кабелю в межах будівлі) [1, 2, 20, 21].

Аналогічні розрахунки виконуються для інших гілок. У більшості випадків, оскільки будівля має схожу поверхову структуру і відстані незначні, всі гілки матимуть близькі значення загальних втрат. У проектній документації оформлюється таблиця із результатами розрахунків для кількох характерних варіантів, вона наведена нижче (Таблиця 3.3).

Таблиця 3.3

Результати розрахунків

Гілка (серверні)	Довжина волокна, м	Кількість роз'єднань	Кількість зварок	Тип розгалуження	Сумарні втрати, дБ	Резерв, дБ
1 поверх	100	6	4	1×8	≈18	≈10
3 поверх	120	6	4	1×16	≈20	≈8
5 поверх	140	6	4	1×16	≈21	≈7

Така форма подачі дозволяє наочно продемонструвати, що в усіх розглянутих варіантах сумарні втрати не перевищують допустимий бюджет і мережа має запас по оптичній потужності.

При проєктуванні важливо не лише виконати розрахунки “на папері”, а й передбачити порядок подальшого контролю параметрів лінії на етапі монтажу та введення в експлуатацію. Для цього плануються вимірювання за допомогою рефлектометра та оптичного вимірювача потужності, результати яких будуть порівнюватися з розрахунковими значеннями.

3.4 Монтаж мережі, її експлуатація та охорона праці

Монтаж оптичної офісної комп’ютерної мережі здійснюється поетапно, з дотриманням технічних вимог та правил охорони праці. У роботі розглядається загальний підхід до організації монтажу, який може бути адаптований до конкретних умов будівлі.

Основні етапи монтажу такі:

1. Підготовчий етап

– уточнення планів приміщень, трасування кабельних маршрутів по будівлі;

– погодження місць розміщення серверної кімнати, поверхових шаф, точок установки оптичних розеток;

– підготовка кабельних лотків, проходів через стіни, установлення кріплень у стояках;

– постачання на об’єкт необхідного обладнання та матеріалів (OLT, ONT, ОРШ, ОРК, розгалужувачі, кабелі, розетки, патч-корди).

2. Монтаж пасивної інфраструктури

– прокладання магістральних оптичних кабелів між серверною та поверхами з дотриманням радіусів вигину, правил кріплення, маркування;

– монтаж оптичних розподільних панелей в серверній, встановлення поверхових шаф ОРШ;

– прокладання горизонтальних кабелів до робочих кімнат, встановлення оптичних розеток ОРА;

– виконання зварювальних робіт: зварювання магістрального кабелю з пігтейлами у серверній та на поверхах, підключення абонентських кабелів;

– первинне маркування волокон, кабелів і портів для полегшення подальшої експлуатації.

3. Монтаж активного обладнання

– встановлення оптичного лінійного терміналу OLT у серверній шафі, підключення до електроживлення та системи заземлення;

– підключення OLT до комутаторів ядра та маршрутизаторів, налаштування базових параметрів мережі;

– встановлення абонентських ONT у службових приміщеннях або безпосередньо біля груп робочих місць, підключення їх до оптичних розеток;

– підключення абонентських пристроїв (комп'ютери, IP-телефони, точки Wi-Fi) до ONT або комутаторів доступу.

4. Випробування та введення в експлуатацію

– проведення вимірювань параметрів оптичних ліній (загасання, відбиття, пошук можливих дефектних ділянок);

– перевірка відповідності розгалуження, фактичної проєктній схемі;

– тестування пропускної здатності, затримки, якості голосових і відеосервісів;

– оформлення протоколів випробувань та актів про введення мережі в експлуатацію.

Експлуатація мережі включає [9, 24]:

1. регулярний моніторинг стану обладнання OLT і ONT, аналіз журналів подій, контроль завантаження портів

2. планові профілактичні огляди кабельних трас, перевірку цілісності кріплень, відсутності механічних пошкоджень кабелю

3. періодичні вимірювання параметрів оптичних ліній, особливо після

проведення ремонтних або будівельних робіт у будівлі

4. своєчасну заміну несправних модулів, оптичних модулів, патч-кордів

5. ведення експлуатаційної документації: схема мережі, журнали робіт, облік аварій та способів їх усунення.

Окремим важливим аспектом є охорона праці під час монтажу та обслуговування оптичної мережі. Роботи виконуються у виробничих та офісних приміщеннях, у стояках, на драбинах, у тісних просторах, що створює певні ризики для персоналу [15, 16, 18].

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. можливість падіння з висоти при роботі на драбинах або підмостках

2. ураження електричним струмом при роботі поблизу силових кабелів або обладнання

3. поранення від уламків оптичного волокна (дрібні гострі частинки скла)

4. вплив випромінювання від оптичних передавачів при недотриманні правил безпечної роботи

5. підвищене навантаження на опорно-руховий апарат при перенесенні важких котушок кабелю і обладнання

6. можливий вплив шуму, пилу та недостатньої освітленості у технічних приміщеннях.

Для зниження ризиків необхідно дотримуватися таких вимог:

1. монтажники повинні проходити інструктаж з охорони праці, знати правила безпечної роботи з оптичним волокном та електрообладнанням

2. при роботі на висоті (на драбинах, помостах) використовувати справні засоби підйому, контролювати стійкість драбини, не перевищувати допустиму висоту та навантаження

3. перед виконанням робіт у зоні, де є силові кабелі, переконатися у відсутності напруги, дотримуватися безпечної відстані, використовувати інструменти з ізолюючими ручками

4. при різанні та обробці оптичного волокна використовувати захисні окуляри і рукавички, а відходи волокна збирати в окрему ємність з кришкою, оскільки дрібні уламки можуть травмувати шкіру або потрапити в очі

5. ніколи не дивитися в торець активного оптичного волокна без спеціальних приладів, оскільки випромінювання лазерних діодів невидиме, але може пошкодити зір

6. забезпечити належну вентиляцію та освітлення в місцях виконання робіт, щоб зменшити навантаження на зір та ризик помилок

7. застосовувати засоби індивідуального захисту: каски, рукавички, спеціальне взуття, у разі потреби – засоби захисту органів дихання.

Важливою складовою охорони праці є організація робочого місця. Інструменти та матеріали повинні бути розкладені таким чином, щоб не створювати перешкод для проходу, а кабельні барабани й обладнання не перекривали евакуаційні шляхи. Тимчасові кабельні прокладки під час випробувань не можна залишати в місцях інтенсивного руху персоналу без захисних коробів чи килимків, щоб уникнути спотикання або пошкодження кабелю.

Під час експлуатації мережі також необхідно дотримуватися вимог безпеки. Будь-які роботи з переналаштування кабелів у ODF, ОРШ чи заміна модулів OLT повинні виконуватися при відключеній напрузі живлення, якщо це вимагається інструкцією виробника. Обслуговування обладнання в серверній слід проводити тільки уповноваженим персоналом, який має доступ до відповідних приміщень і пройшов навчання [9, 24].

У третьому розділі сформовано цілісний підхід до проєктування оптичної офісної комп’ютерної мережі: від визначення вихідних даних і вибору структури до трасування оптичних кабелів, розрахунку бюджету потужності та організації монтажу й експлуатації з урахуванням вимог охорони праці. Така побудова розділу відповідає завданню на кваліфікаційну роботу і створює основу для подальшого техніко-економічного обґрунтування проєкту у наступному розділі.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

4.1 Розрахунок капітальних витрат

Капітальні витрати включають одноразові вкладення на створення оптичної мережі: придбання активного та пасивного мережного обладнання, виконання проєктних, монтажних і пусконалагоджувальних робіт, а також резерв на непередбачені витрати [15, 16, 18].

До складу капітальних витрат відносяться такі основні статті:

1. активне обладнання (OLT, абонентські термінали ONT, комутатори доступу, джерела безперебійного живлення);
2. пасивна оптична інфраструктура (магістральні та розподільчі оптичні кабелі, оптичні розгалужувачі, кросові панелі, шафи, оптичні розетки, патч-корди, пігтейли, витратні матеріали для зварювання);
3. проєктні роботи;
4. монтажні та пусконалагоджувальні роботи;
5. резерв на непередбачені витрати.

На основі конфігурації мережі приймаються такі орієнтовні кількості обладнання та матеріалів:

1. OLT – 1 шт.;
2. абонентські термінали ONT – 20 шт.;
3. комутатори доступу – 5 шт.;
4. джерела безперебійного живлення – 3 шт.;
5. магістральний оптичний кабель – 300 м;
6. розподільчий оптичний кабель – 1000 м;
7. оптичні розгалужувачі – 16 шт.;
8. комплекти ODF, шаф, боксів та оптичних розеток – 10 комплектів;
9. патч-корди, пігтейли та інші дрібні матеріали – 200 позицій.

Для прикладового розрахунку використовуються такі орієнтовні ціни:

1. OLT – 80 000 грн/шт;
2. ONT – 2 500 грн/шт;
3. комутатор доступу – 7 000 грн/шт;
4. UPS – 6 000 грн/шт;
5. магістральний оптичний кабель – 45 грн/м;
6. розподільчий оптичний кабель – 35 грн/м;
7. оптичний розгалужувач – 800 грн/шт;
8. комплект ODF/шафа/бокси/розетки – 3 000 грн/комплект;
9. патч-корд/пігтейл/матеріали – 150 грн/позиція;
10. розробка проєктної документації – 25 000 грн;
11. монтажні роботи – 40 000 грн;
12. пусконалагоджувальні роботи – 20 000 грн.

Тоді капітальні витрати за основними статтями становлять:

1. OLT: $1 \cdot 80\,000 = 80\,000$ грн;
2. ONT: $20 \cdot 2\,500 = 50\,000$ грн;
3. комутатори доступу: $5 \cdot 7\,000 = 35\,000$ грн;
4. UPS: $3 \cdot 6\,000 = 18\,000$ грн;
5. магістральний кабель: $300 \cdot 45 = 13\,500$ грн;
6. розподільчий кабель: $1000 \cdot 35 = 35\,000$ грн;
7. оптичні розгалужувачі: $16 \cdot 800 = 12\,800$ грн;
8. комплекти ODF/шафи/бокси/розетки: $10 \cdot 3\,000 = 30\,000$ грн;
9. патч-корди, пігтейли, матеріали: $200 \cdot 150 = 30\,000$ грн;
10. проєктні роботи: 25 000 грн;
11. монтажні роботи: 40 000 грн;
12. пусконалагоджувальні роботи: 20 000 грн.

Сумарні капітальні витрати без урахування резерву (K_осн) становлять:

$$K_{осн} = 80\,000 + 50\,000 + 35\,000 + 18\,000 +$$
$$13\,500 + 35\,000 + 12\,800 + 30\,000 + 30\,000 +$$

25 000 + 40 000 + 20 000 =

389 300 грн.

Загальний підсумок для всіх статей доцільно подати в таблиці 4.1, де наводяться найменування статті, кількість, ціна за одиницю, сума та частка у загальних капітальних витратах.

Таблиця 4.1

Структура капітальних витрат

Найменування статті	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн	Частка у загальних КВ, %
OLT	1 шт	80 000	80 000	20,55
ONT	20 шт	2 500	50 000	12,84
Комутатори доступу	5 шт	7 000	35 000	8,99
UPS	3 шт	6 000	18 000	4,62
Магістральний оптичний кабель	300 м	45	13 500	3,47
Розподільчий оптичний кабель	1000 м	35	35 000	8,99
Оптичні розгалужувачі (спліттери)	16 шт	800	12 800	3,29
Комплекти ODF/шафи/бокси/розетки	10 компл.	3 000	30 000	7,71
Патч-корди/пігтейли/матеріали	200 позицій	150	30 000	7,71
Розробка проєктної документації	1 послуга	25 000	25 000	6,42
Монтажні роботи	1 послуга	40 000	40 000	10,27
Пусконалагоджувальні роботи	1 послуга	20 000	20 000	5,14
Разом	—	—	389 300	100,00

Загальні капітальні витрати визначаються як сума всіх статей:

$$K_{\text{заг}} = \Sigma K_i$$

де $K_{\text{заг}}$ – загальні капітальні витрати на створення мережі, грн;

K_i – капітальні витрати за і-тою статтею, грн.

Резерв на непередбачені витрати приймемо на рівні 10 % від K_осн:

$$K_{\text{рез}} = 0{,}1 * K_{\text{осн}}$$

$$K_{\text{рез}} = 0{,}1 * 389\,300 \approx 38\,900 \text{ грн.}$$

Тоді:

$$K_\text{заг} = K_\text{осн} + K_\text{рез}$$

$$K_\text{заг} = 389\,300 + 38\,900 \approx 428\,200 \text{ грн.}$$

Для порівняння з іншими варіантами доцільно визначити питомі капітальні витрати на одного користувача та на один порт доступу:

$$K_{\text{пит}_{\text{кор}}} = \frac{K_{\text{заг}}}{N_{\text{кор}}}$$

$$K_{\text{пит}_{\text{порт}}} = \frac{K_{\text{заг}}}{N_{\text{порт}}}$$

$$\text{За } N_{\text{кор}} = 150, N_{\text{порт}} = 200\text{:}$$

$$K_{\text{пит}_{\text{кор}}} \approx \frac{428\,200}{150} \approx 2\,850 \frac{\text{грн}}{\text{користувач}}$$

$$K_{\text{пит}_{\text{порт}}} \approx \frac{428\,200}{200} \approx 2\,140 \frac{\text{грн}}{\text{порт}}$$

Отримані значення показують рівень одноразових інвестицій у мережну інфраструктуру в розрахунку на одного користувача та один порт.

4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати відображають щорічні витрати на підтримання працездатності мережі протягом усього строку її експлуатації. До основних статей експлуатаційних витрат для оптичної офісної мережі належать:

витрати на електроенергію;

1. витрати на технічне обслуговування та дрібні ремонти;
2. витрати на персонал (частка заробітної плати фахівців, що обслуговують мережу);
3. витрати на оренду приміщень (за наявності окремої оренди серверної та комунікаційних приміщень);
4. витрати на програмне забезпечення та ліцензії;

5. інші витрати (витратні матеріали, запасні частини, сервісні контракти).

Річні витрати на електроенергію ($V_{\text{ел}}$) визначаються за формулою:

$$V_{\text{ел}} = P_{\text{сум}} * t_{\text{рік}} * T_{\text{ел}}$$

де $P_{\text{сум}}$ – сумарна встановлена потужність активного обладнання мережі, кВт;

$t_{\text{рік}}$ – час роботи обладнання за рік, год;

$T_{\text{ел}}$– тариф на електроенергію, грн/(кВт·год).

Витрати на персонал можна оцінити як:

$$V_{\text{перс}} = Z_{\text{міс}} * 12$$

де $Z_{\text{міс}}$ – сумарні місячні витрати на персонал, що обслуговує мережу.

Інші статті (обслуговування, оренда, програмне забезпечення, інші витрати) визначаються за кошторисними оцінками або договорними тарифами. Сумарні річні експлуатаційні витрати ($E_{\text{опт}}$) обчислюються як сума всіх статей:

$$E_{\text{опт}} = \Sigma V_j$$

де $V_j - j$ –та стаття експлуатаційних витрат за рік.

Для проєктованої оптичної мережі, виходячи з потужності обладнання та масштабів системи, умовно приймемо такі річні витрати [15, 16, 18]:

1. електроенергія – 25 000 грн/рік;
2. технічне обслуговування і ремонти – 20 000 грн/рік;
3. персонал – 60 000 грн/рік;
4. оренда площ – 18 000 грн/рік;
5. програмне забезпечення та ліцензії – 15 000 грн/рік;
6. інші витрати – 12 000 грн/рік.

Тоді:

$$E_{\text{опт}} = 25\,000 + 20\,000 + 60\,000 + 18\,000 + 15\,000 + 12\,000 = 150\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}.$$

Структуру експлуатаційних витрат доцільно подати в таблиці 4.2 із зазначенням частки кожної статті у загальній сумі.

Для аналізу ефективності зручно використовувати питомі експлуатаційні витрати на одного користувача:

$$E_{\text{пит}_{\text{кор}}} = \frac{E_{\text{опт}}}{N_{\text{кор}}}$$

При $E_{\text{опт}}$ = 150 000 грн/рік та $N_{\text{кор}} = 150$:

$$E_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{опт}}} = \frac{150\,000}{150} = 1\,000 \frac{\text{грн}}{\text{користувач}} \cdot \text{рік}.$$

4.3 Порівняльний аналіз та економічні показники

Для оцінки економічної ефективності впровадження оптичної мережі виконаємо порівняння з базовим варіантом побудови офісної мережі на основі мідної кабельної інфраструктури. Розглядаються два варіанти [15, 16, 18]:

базовий варіант – мідна офісна мережа;

проєктований варіант – оптична мережа на основі технології PON [15, 16, 18].

Припускається, що обидва варіанти забезпечують однакову кількість користувачів та набір сервісів. На основі попередніх розрахунків та узагальнених даних приймемо орієнтовні значення:

$$K_{\text{мід}} \approx 330\,000 \text{ грн}$$

$$K_{\text{опт}} \approx 428\,000 \text{ грн}$$

$$E_{\text{мід}} \approx 210\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

$$E_{\text{опт}} \approx 150\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Тобто оптичний варіант потребує більших початкових капітальних витрат, але забезпечує менші річні експлуатаційні витрати за рахунок зменшення кількості активного обладнання, нижчого споживання електроенергії та спрощення обслуговування.

Питомі капітальні витрати для обох варіантів у розрахунку на одного користувача становлять:

$$K_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{мід}}} = \frac{K_{\text{мід}}}{N_{\text{кор}}}$$

$$K_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{опт}}} = \frac{K_{\text{опт}}}{N_{\text{кор}}}$$

За $N_{\text{кор}} = 150$:

$$K_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{мід}}} \approx \frac{330\,000}{150} = 2\,200 \frac{\text{грн}}{\text{користувач}}$$

$$K_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{опт}}} \approx \frac{428\,000}{150} \approx 2\,850 \frac{\text{грн}}{\text{користувач}}$$

Питомі експлуатаційні витрати на одного користувача:

$$E_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{мід}}} = \frac{E_{\text{мід}}}{N_{\text{кор}}}$$

$$E_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{опт}}} = \frac{E_{\text{опт}}}{N_{\text{кор}}}$$

$$E_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{мід}}} \approx \frac{210\,000}{150} = 1\,400 \frac{\text{грн}}{\text{користувач}} \cdot \text{рік}$$

$$E_{\text{пит}_{\text{кор}}^{\text{опт}}} = \frac{150\,000}{150} = 1\,000 \frac{\text{грн}}{\text{користувач}} \cdot \text{рік}$$

Річна економія експлуатаційних витрат при переході до оптичного варіанта становить:

$$\Delta E = E_{\text{мід}} - E_{\text{опт}}$$

$$\Delta E = 210\,000 - 150\,000 = 60\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}.$$

Простий строк окупності додаткових капітальних витрат оптичної мережі визначається за формулою [15, 16, 18]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{(K_{\text{опт}} - K_{\text{мід}})}{(E_{\text{мід}} - E_{\text{опт}})}.$$

Підставляючи числові значення, одержуємо:

$$T_{\text{ок}} = \frac{(428\,000 - 330\,000)}{(210\,000 - 150\,000)} =$$

$$\frac{98\,000}{60\,000} \approx 1{,}6 \text{ року.}$$

Отже, додаткові інвестиції в оптичну мережу окуповуються приблизно за 1,5–2 роки за рахунок зниження експлуатаційних витрат. Надалі оптичний варіант забезпечує чисту економію коштів.

Крім прямої економії, оптична мережа має додаткові переваги: підвищена надійність, менша чутливість до електромагнітних завад, можливість подальшого нарощування пропускної здатності без повної заміни кабельної інфраструктури, консолідація різних типів трафіку (дані, голос, відео) в єдиній фізичній мережі. У сукупності це підтверджує технічну та економічну доцільність впровадження оптичної офісної мережі на основі технології PON для розглянутого об’єкта [15, 16, 18].

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розроблено проєкт оптичної офісної комп’ютерної мережі на основі технології PON та проведено оцінку її технічної й економічної ефективності.

Проаналізовано вимоги до сучасних офісних мереж, їх структуру та основні компоненти, визначено фактори, що впливають на пропускну здатність, надійність і масштабованість мережної інфраструктури.

Досліджено архітектуру та принципи роботи пасивних оптичних мереж, порівняно технології PON/GPON з традиційними мідними рішеннями й обґрунтовано доцільність використання GPON для офісної мережі.

Розроблено структурну схему оптичної офісної мережі для заданої будівлі, виконано вибір обладнання та кабельної інфраструктури з урахуванням подальшого розширення мережі.

Проведено розрахунок бюджету оптичної потужності та показано, що обрана конфігурація мережі забезпечує необхідний запас по потужності й відповідає вимогам до якості сигналу.

Виконано розрахунок капітальних витрат на впровадження оптичної мережі та річних експлуатаційних витрат, сформовано їх структуру та питомі показники на одного користувача.

Порівняно оптичний варіант із базовою мідною мережею, встановлено, що при дещо вищих капітальних витратах оптична мережа забезпечує істотне зниження експлуатаційних витрат і строк окупності додаткових інвестицій на рівні приблизно 1,5–2 років.

Показано, що використання технології PON дозволяє зменшити кількість активного обладнання в розподільчій частині, скоротити споживання електроенергії, підвищити надійність мережі та створити резерв пропускної здатності для подальшої модернізації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Оптические системы широкополосного доступа, базирующиеся на пассивной оптической сети (PON): Рекомендация МСЭ-Т G.983.1. – Женева: МСЭ, 2005.
2. Optical line systems for local and access networks. Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics: Recommendation ITU-T G.984.1. – Geneva: ITU, 2008.
3. ITU-T Recommendation G.984.2. Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification. – Geneva: ITU, 2003.
4. ITU-T Recommendation G.984.3. Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence (TC) layer specification. – Geneva: ITU, 2004.
5. ITU-T Recommendation G.987.1. 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements. – Geneva: ITU, 2010.
6. ISO/IEC 11801:2017. Information technology – Generic cabling for customer premises. – Geneva: ISO/IEC, 2017.
7. IEEE Computer Society. IEEE Standard for Ethernet (IEEE 802.3). – New York: IEEE Press, 2018. – 1632 p.
8. IEEE Std 802.3ah-2004. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications – Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks. – New York: IEEE, 2004.
9. ТКП 300-2011. Пассивные оптические сети. Правила проектирования и монтажа [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docplayer.ru/52403501-Tkp-02140-passivnye-opticheskie-seti-pravila-proektirovaniya-i-montazha
10. Таненбаум Э. С., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. – Санкт-Петербург: Питер Пресс, 2019. – 960 с.

11. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. 3-е изд. – Москва; Санкт-Петербург: Питер, 2007. – 957 с.
12. Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. – 7th ed. – Boston: Pearson, 2017. – 864 p.
13. Stallings W. Data and Computer Communications. – 10th ed. – Boston: Pearson, 2014. – 888 p.
14. Горбатий І. В., Бондарєв А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи: навч. посіб. – Львів: Львівська політехніка, 2016. – 336 с.
15. Скляров О. К., Гусев М. Ю. Волоконно-оптические сети и системы связи: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 268 с.
16. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Волоконно-оптичні системи передачі: навч. посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 225 с.
17. Семенов А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных структурированных кабельных систем. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
18. Keiser G. Optical Fiber Communications. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill, 2013. – 752 p.
19. Ramaswami R., Sivarajan K., Sasaki G. Optical Networks: A Practical Perspective. – 3rd ed. – San Francisco: Morgan Kaufmann, 2010. – 928 p.
20. Зингеренко Ю. А. Пассивные оптические сети xPON: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2020. – 156 с.
21. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Котенко М. О., Омецінська О. Б.; за ред. В. Б. Катка. Пасивні мережі доступу (xPON). – Київ: Техніка, 2010. – 224 с.
22. Петренко И. И., Убайдуллаев Р. Р. Пассивные оптические сети PON. Часть 1. Архитектура и стандарты // Lightwave Russian Edition. – 2004. – № 1. – С. 22–31.
23. Петренко И. И., Убайдуллаев Р. Р. Пассивные оптические сети PON. Часть 2. Ethernet на первой миле // Lightwave Russian Edition. – 2004. – № 2. – С. 48–56.

24. Русакова Е. А. Проектирование сети доступа на базе технологии PON: метод. указания. – Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 158 с.
25. Kramer G. Ethernet Passive Optical Networks. – New York: McGraw-Hill, 2005. – 211 p.
26. Maier M. WDM Passive Optical Networks and Beyond // Journal of Optical Networking. – 2009. – Vol. 1. – No. 4. – P. C1–C20.
27. Luo Y., Ansari N. Energy-efficient next generation passive optical network // Optical Switching and Networking. – 2014. – Vol. 11, Part B. – P. 87–97.
28. Вандич А. П., Ефимов В. В., Никульский И. Е., Степуленок О. А. Прикладные аспекты применения сетевых технологий WDM-PON // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5. – № 1. – С. 49–52.
29. Chenika A., Vavoulas A., Matrakidis C. та ін. Demonstration of 640 Gbps/160 Gbps WDM-PON system over 30 km SSMF // Journal of Optical Communications. – 2024. – (Early Access).
30. Всеукраинский проект UA.PON v6.0 – Будущее за пассивными сетями [Електронний ресурс]. – Режим доступу.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ
(ПРЕЗЕНТАЦІЯ)