Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Кібербезпеки
(повна назва)
Кафедра Інформаційно-мережна інженерія
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розробка мережі широкосмугового доступу за технологією GEPON для котеджного селища
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи ТРІМІ-22-1
Микола Мирошниченко
(власне ім'я, прізвище)
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія
(повна назва освітньої програми)
Керівник проф. Володимир Рапін
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

В.о. завідувача кафедри _____ Дарія Чеботарьова
(підпис) (власне ім'я прізвище)

2026 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Кібербезпеки

Кафедра Інформаційно-мережна інженерія

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«08» липня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві Мирошниченку Миколі Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка мережі широкосмугового доступу за технологією GEPON для котеджного селища

затверджена наказом університету від «02» червня 2026 р. № 466Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії «10» липня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: котеджне селище розміщено у зоні відпочинку і містить 70 - 80 приватних будинків, розміщених на трьох суміжних вулицях. Мешканці кожного будинку, у середньому, мають типовий склад пристроїв користувачів до складу якого входять комп'ютери, планшети, ноутбуки, смартфони, маршрутизатор та інші. Потрібно провести проектування мережі, розробити модель, і провести аналітичний розрахунок оптичного бюджету GEPON.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ

1 Аналітичний огляд сучасних технологій побудови локальних мереж

2 Проектування телекомунікаційної мережі за технологією GEPON

3 Розробка волоконно-оптичної моделі мережі селища, моделювання затухання оптичного сигналу та розрахунок оптичного бюджету PON-мережі.

Висновки,

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) __Слайди у форматі Power Point, назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи, зображення проєктної зони селища, структурна схема телекомунікаційної мережі, імітаційна модель мережі, результати моделювання затухання та розрахунку оптичного бюджету PON.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	08.06.26	
2	Підбір та вивчення літератури за темою роботи	09.06-12.06.26	
3	Виконання розділу 1	13.06-18.06.26	
4	Виконання розділу 2	19.06-23.06.26	
5	Виконання розділу 3	24.06-01.07.26	
6	Оформлення пояснювальної записки	02.07-06.07.26	
7	Оформлення презентаційного матеріалу,	07.07-09.07.26	
8	Подача роботи до ЕК	10.07.26	

Дата видачі завдання ____8 червня_____2026_ р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ __проф. Володимир Рапін_____
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 69 с., 19 рис., 7 табл., 7 джерел, 1 додаток.

Об’єктом розробки є пасивна оптична мережа абонентського доступу для котеджного селища.

Мета кваліфікаційної роботи — розробка лінійно-кабельної інфраструктури мережі широкосмугового доступу за технологією GEPON для котеджного селища та перевірка її працездатності за критеріями оптичного бюджету і пропускної здатності.

Основні завдання:
– аналіз сучасних технологій побудови пасивних оптичних мереж та обґрунтування вибору технології GEPON;
– визначення вихідних даних для проєктування мережі котеджного селища;
– розрахунок очікуваного абонентського навантаження та обґрунтування структури мережі;
– вибір активного і пасивного мережевого обладнання;
– проєктування трас прокладання оптичного кабелю та розміщення PON-боксів;
– розробка волоконно-оптичної моделі мережі;
– моделювання затухання оптичного сигналу, розрахунок оптичного бюджету та оцінка пропускної здатності PON-гілок.

У результаті виконання роботи розроблено структуру пасивної оптичної мережі доступу GEPON для абонентського кластера котеджного селища. Запропоновано поділ мережі на три PON-гілки, визначено розміщення розподільчих PON-боксів, сформовано волоконно-оптичну модель та виконано перевірку працездатності мережі. Розрахунок показав, що максимальне сумарне затухання становить 22,55 дБ і не перевищує допустимий оптичний бюджет 24 дБ. При розрахунковому піковому навантаженні завантаження одного PON-порту становить близько 70,4%, що підтверджує наявність експлуатаційного запасу пропускної здатності.

GEPON, PON, FTTH, OLT, ONU, ONT, ODF, ОПТИЧНИЙ БЮДЖЕТ, PLC-СПЛІТЕР, PON-БОКС, ДРОП-КАБЕЛЬ, ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА МЕРЕЖА, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ.

ABSTRACT

Explanatory note: 69 pages, 19 figures, 7 tables, 7 references, 1 appendix.

The object of development is a passive optical access network for a cottage settlement.

The purpose of the qualification work is to develop the line-cable infrastructure of a broadband access network based on GEPON technology for a cottage settlement and to verify its operability according to the criteria of optical budget and bandwidth capacity.

Main tasks:
– analysis of modern technologies for building passive optical networks and justification of the choice of GEPON technology;
– determination of input data for designing the network of a cottage settlement;
– calculation of the expected subscriber traffic load and justification of the network structure;
– selection of active and passive network equipment;
– design of optical cable routing and placement of PON boxes;
– development of the fiber-optic network model;
– modeling of optical signal attenuation, calculation of the optical budget, and evaluation of the bandwidth capacity of PON branches.

As a result of the work, the structure of a passive optical GEPON access network for the subscriber cluster of a cottage settlement was developed. The network was divided into three PON branches, the placement of distribution PON boxes was determined, a fiber-optic model was formed, and the operability of the network was verified. The calculation showed that the maximum total attenuation is 22.55 dB, which does not exceed the allowable optical budget of 24 dB. Under the calculated peak load, the utilization of one PON port is about 70.4%, which confirms the availability of an operational bandwidth reserve.

GEPON, PON, FTTH, OLT, ONU, ONT, ODF, OPTICAL BUDGET, PLC SPLITTER, PON BOX, DROP CABLE, FIBER-OPTIC NETWORK, BANDWIDTH CAPACITY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 7
1 ТЕХНОЛОГІЯ PON, ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ 9
1.1 Еволюція телекомунікаційних мереж 9
1.2 Технологія PON і основні види стандартів 10
1.3 Топології побудови мереж PON 13
1.4 Компоненти пасивних оптичних мереж 16
1.5 Моделювання телекомунікаційних мереж PON та системи автоматизованого проєктування 18
Висновки до розділу 1 21
2 РОЗРОБКА ЛІНІЙНО-КАБЕЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖІ 23
2.1 Архітектурно-планувальна характеристика котеджного селища 23
2.2 Розрахунок навантаження мережі та обґрунтування структурної схеми 27
2.3 Вибір та обґрунтування мережевого обладнання 32
2.4 Проєктування трас прокладання оптичного кабелю 41
Висновки до розділу 2 45
3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ МЕРЕЖІ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЇЇ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ 46
3.1 Розробка волоконно-оптичної моделі мережі 46
3.2 Аналітичне моделювання оптичного бюджету 49
3.3 Моделювання пропускної здатності мережі PON 53
Висновки до розділу 3 58
ВИСНОВКИ 60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 61
ДОДАТОК А 62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) — асиметрична цифрова абонентська лінія.

DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) — алгоритм динамічного розподілу смуги пропускання.

FTTB (Fiber to the Building) — архітектура «оптичне волокно до будівлі».

FTTH (Fiber to the Home) — архітектура «оптичне волокно до квартири/будинку».

GEPON (Gigabit Ethernet Passive Optical Network) — гігабітна пасивна оптична мережа на базі протоколу Ethernet.

GPON (Gigabit Passive Optical Network) — гігабітна пасивна оптична мережа.

ODF (Optical Distribution Frame) — оптичний кросовий вузол.

ODN (Optical Distribution Network) — оптична розподільча мережа.

OLT (Optical Line Terminal) — оптичний лінійний термінал (станційне обладнання).

ONT / ONU (Optical Network Terminal / Unit) — оптичний мережевий термінал / блок (абонентське обладнання).

PON (Passive Optical Network) — пасивна оптична мережа.

QoS (Quality of Service) — якість обслуговування.

WDM (Wavelength Division Multiplexing) — спектральне ущільнення каналів.

SFP (Small Form-factor Pluggable) — змінний приймально-передавальний модуль для підключення мережевого обладнання до оптичної або мідної лінії зв’язку.

SFP+ — високошвидкісний змінний приймально-передавальний модуль, що використовується для організації uplink-з’єднань зі швидкістю до 10 Гбіт/с.

ВСТУП

Сучасний розвиток телекомунікаційних мереж пов’язаний зі зростанням потреб користувачів у високошвидкісному та стабільному доступі до мережі Інтернет. Для приватної котеджної забудови актуальним є використання волоконно-оптичних технологій, які забезпечують високу пропускну здатність, надійність і можливість подальшого розширення мережі. Одним із ефективних рішень для побудови мереж абонентського доступу є технологія GEPON, що базується на пасивній оптичній розподільчій мережі.

Актуальність роботи полягає в необхідності розробки лінійно-кабельної інфраструктури GEPON-мережі для приватного сектору з урахуванням кількості абонентів, розташування будинків, наявної опорної інфраструктури, очікуваного навантаження та вимог до працездатності мережі.

Метою дипломної роботи є розробка лінійно-кабельної інфраструктури пасивної оптичної мережі доступу GEPON для котеджного селища та перевірка її працездатності за критеріями оптичного бюджету і пропускної здатності.

Об’єктом роботи є пасивна оптична мережа абонентського доступу для приватної котеджної забудови. Предметом роботи є структура побудови GEPON-мережі, схема трасування оптичних ліній, розподіл абонентів між PON-гілками, параметри затухання оптичного сигналу та завантаження PON-портів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно проаналізувати принципи побудови пасивних оптичних мереж, обґрунтувати вибір технології GEPON, визначити вихідні дані для проєктування, розрахувати абонентське навантаження, вибрати обладнання, розробити схему трасування, сформувати волоконно-оптичну модель мережі та виконати перевірку її працездатності.

У роботі використано методи аналітичного розрахунку, структурного проєктування, трасування лінійно-кабельної інфраструктури та моделювання основних параметрів мережі. Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої структури як основи для побудови FTTH/GEPON-мережі в умовах приватної котеджної забудови.

1 ТЕХНОЛОГІЯ PON, ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ

1.1 Еволюція телекомунікаційних мереж

Розвиток інфокомунікацій супроводжується постійною трансформацією абонентської ділянки мережі, яка тривалий час залишалася найбільш консервативним сегментом телекомунікаційної інфраструктури. Якщо на початкових етапах розвитку мережі загального користування основною задачею була передача мовного сигналу в обмеженій смузі частот, то сьогодні вимоги до мереж доступу диктуються необхідністю трансляції важкого мультимедійного контенту, відео високої чіткості (4K та 8K) та забезпечення роботи інтерактивних хмарних сервісів. Це призвело до появи терміну «мережа абонентського доступу», що охоплює не лише лінійні споруди, а й складний комплекс обладнання для доставки високошвидкісних цифрових потоків безпосередньо до користувача.

Історично першим кроком до широкосмуговості стало впровадження технологій сімейства xDSL на базі існуючих мідних ліній зв'язку. Використання асиметричних цифрових ліній (ADSL) дозволило операторам подарувати «друге життя» мідній інфраструктурі, перетворюючи звичайну телефонну пару на тракт передачі даних. Проте, попри відносну дешевизну та простоту розгортання, мідні технології зіткнулися з фундаментальними фізичними обмеженнями. Основними деструктивними факторами стали перехресні наводки між парами в кабелі та стрімке затухання сигналу з ростом частоти, що обмежувало радіус дії мережі та її пропускну здатність, особливо у зворотному каналі. Наприклад, при використанні ADSL2+ швидкість передачі даних від абонента залишається критично низькою для сучасних потреб, таких як відеоконференції або хмарні бекапи.

Критичний аналіз розвитку галузі свідчить, що подальше нарощування швидкостей на металевих кабелях є економічно недоцільним через обмеження

довжини лінії та високу вартість експлуатації. Це зумовило масовий перехід до оптичних технологій архітектури FTTx. Технологія «волокно до будівлі» (FTTB) стала перехідним етапом, за якого оптичний кабель доводиться до будівлі або найближчого розподільчого вузла, а підключення кінцевих абонентів на останній ділянці може виконуватися мідною витою парою. Проте така схема має недоліки, пов'язані з необхідністю живлення активного обладнання та обмеженнями мідної ділянки, що робить її менш придатною для побудови повністю оптичної мережі приватного сектору [1].

Логічним завершенням цієї еволюції стала поява пасивних оптичних мереж (PON), які реалізують концепцію «повного переходу на оптику». Використання деревоподібної топології з пасивним розгалуженням дозволило усунути проміжне активне обладнання, значно підвищити надійність мережі та забезпечити гнучкий розподіл ресурсів між користувачами. Сьогодні технологія GEPON виступає одним з найбільш збалансованих рішень, що поєднує переваги протоколу Ethernet із високою ефективністю оптичного волокна, вирішуючи проблему «останньої милі» з максимальним запасом потужності на майбутнє [1; 2].

1.2 Технологія PON і основні види стандартів

Стрімкий розвиток пасивних оптичних мереж спричинив появу кількох паралельних гілок стандартизації, кожна з яких базується на різних протоколах передачі даних. Перші інженерні рішення у цьому напрямку були розроблені консорціумом FSAN, що призвело до впровадження стандартів APON та BPON, які використовували архітектуру ATM як транспортний рівень. Однак із поступовим витісненням технології ATM з магістральних та локальних мереж, домінуючі положення зайняли стандарти, орієнтовані на протокол Ethernet та високошвидкісну передачу інформації. Сьогодні основними конкурентами на світовому ринку виступають технології GPON (сімейство стандартів ITU-T G.984) та GEPON (стандарт IEEE 802.3ah) [3].

Ключовою особливістю технологій GEPON (Gigabit Ethernet Passive Optical Network) є їхня повна відповідність загальноприйнятим стандартам Ethernet, що

значно спрощує інтеграцію мереж абонентського доступу з обладнанням Metro Ethernet та локальними мережами підприємств. На відміну від технологій GPON, які використовують складну інкапсуляцію кадрів GEM, мережі GEPON працюють з нативними кадрами Ethernet. Це дозволяє уникати додаткових перетворень протоколів, знижує загальну вартість кінцевих пристроїв та полегшує процеси адміністрування телекомунікаційних систем. Стандарт IEEE 802.3ah визначає швидкість передачі даних на рівні 1,25 Гбіт/с в обох напрямках, забезпечуючи симетричний режим роботи, що є критично важливим для сучасних мультисервісних служб із великими об’ємами вихідного трафіку [3].

З точки зору фізичного рівня, функціонування пасивних оптичних мереж GEPON базується на принципах спектрального ущільнення каналів (WDM), де для передачі вихідних потоків від абонентів до станцій (Upstream) використовується довжина хвилі 1310 нм, а для вхідних потоків (Downstream) — 1490 нм. Крім того, архітектури оптичних систем передбачають можливість резервування довжини хвилі 1550 нм для трансляції аналогових або цифрових телевізійних сигналів, що реалізується шляхом встановлення додаткових оптичних підсилювачів та мультиплексорів на станційних вузлах. Коефіцієнти розгалуження в типових мережах GEPON дозволяють підключати до 32 або 64 абонентських пристроїв на один оптичний порт станції, забезпечуючи радіус покриття до 20 км.

Важливою перевагою рішень на базі GEPON є підтримка механізмів динамічного розподілу смуги пропускання (DBA — Dynamic Bandwidth Allocation). Ці алгоритми дозволяють гнучко перерозподіляти вільні ресурси волокна між активними користувачами в режимі реального часу. Таким чином, абоненти можуть тимчасово отримувати більшу частку спільної смуги пропускання, якщо інші абонентські термінали в межах цієї PON-гілки у цей момент не створюють значного навантаження. Це не тільки покращує параметри якості обслуговування (QoS), але й дозволяє операторам зв'язку більш ефективно утилізувати мережеві ресурси, забезпечуючи стабільну роботу таких сервісів, як IP-телефонія та потокове відео високої чіткості [1; 2].

Для комплексного аналізу еволюції технологій пасивних оптичних мереж та розуміння технічних відмінностей між різними поколіннями обладнання, зведемо характеристики всіх основних стандартів PON (від ранніх розробок до сучасних рішень) у таблицю 1.1 [3; 4].

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики стандартів технології PON

Технічні параметри мереж	**APON**	**BPON**	**GEPON (EPON)**	**GPON**
Базовий стандарт	ITU-T G.983	ITU-T G.983.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Транспортний протокол	ATM	ATM	Ethernet	GEM, ATM, Ethernet
Швидкість у низхідному напрямку (Downstream)	155 Мбіт/с	622 Мбіт/с	1,25 Гбіт/с	2,488 Гбіт/с
Швидкість у висхідному напрямку (Upstream)	155 Мбіт/с	155 Мбіт/с	1,25 Гбіт/с	1,244 Гбіт/с
Максимальний коефіцієнт розгалуження (ємність)	До 1:32	До 1:32	До 1:64	До 1:128
Максимальний радіус дії лінії зв'язку	До 20 км	До 20 км	До 20 км	До 60 км
Допустиме затухання в пасивній лінії (ODN)	25 дБ	25 дБ	26 дБ	22 дБ

Як видно з наведеного аналізу, технології APON та BPON мають суттєві обмеження щодо пропускної здатності та базуються на застарілому протоколі ATM, через що вони практично витіснені з ринку сучасних телекомунікацій. Боротьба за побудову нових мереж абонентського доступу розгортається виключно між стандартами GEPON та GPON, де вибір залежить від конкретних економічних та архітектурних вимог проєктувальників.

1.3 Топології побудови мереж PON

Вибір оптимальних топологій є одним із ключових етапів проєктування мереж абонентського доступу, оскільки саме архітектурні рішення визначають сумарну протяжність кабельних ліній, кількість необхідних оптичних портів на станціях та загальну надійність проєктованих систем. У сучасній інженерній практиці розглядають кілька основних варіантів побудови оптичних мереж, до яких відносяться кільцеві структури, з'єднання типу «точка-точка», зіркоподібні та шинні конфігурації, а також деревоподібні структури з пасивними розгалужувачами. Кожна з цих архітектур мають свої специфічні особливості, що визначають доцільність їх застосування в різних умовах забудови, зокрема в приватному секторі [2].

Кільцеві топології, які довели свою високу ефективність у магістральних міських мережах завдяки автоматичним механізмам самовідновлення, виявляються малопридатною основою для мереж абонентського доступу через непередбачуваність географічного розташування нових користувачів. Процеси підключення нових абонентів у такі структури вимагають постійних розривів чинних ліній та вставки додаткових кабельних сегментів, що на практиці часто призводить до появи так званих «стиснутих кілець», схема яких наведена на рисунку 1.1. Подібні геометричні деформації значно знижують надійність телекомунікаційних систем та повністю нівелюють головну інженерну перевагу кільцевих конфігурацій — резервування шляхів передачі даних.

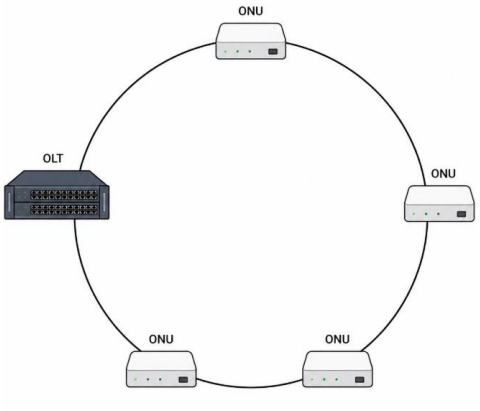


Рисунок 1.1 – Схема побудови кільцевої архітектури мережі

Водночас структури типу «точка-точка» хоч і забезпечують максимальний рівень інформаційної безпеки та повну відсутність конкуренції за смугу пропускання між клієнтами, є економічно неефективними для масового сегмента ринку, оскільки вимагають прокладання окремого волокна до кожного приватного будинку, як показано на рисунку 1.2 [1].

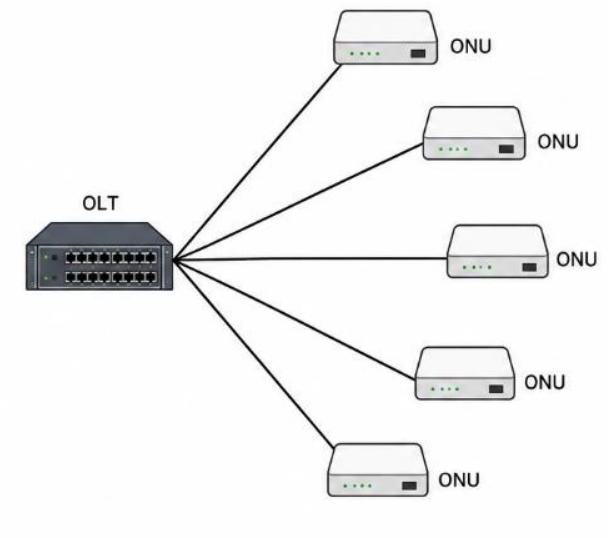


Рисунок 1.2 – Схема організації з'єднань за топологіями «точка-точка»

Специфічні умови щільної забудови іноді диктують використання архітектур типу «зірка» або «шина». Зіркоподібні схеми зазвичай застосовуються при високій щільності розміщення об'єктів, розташованих на мінімальній відстані від центральних комутаційних вузлів, що продемонстровано на рисунку 1.3. У таких випадках пасивні розгалужувачі розміщуються безпосередньо в приміщеннях станцій, що значно спрощує проведення експлуатаційних вимірювань, проте не забезпечує суттєвої економії волоконно-оптичного ресурсу магістральних кабелів. Шинні топології, своєю чергою, можуть бути ефективними виключно при лінійному розташуванні будівель уздовж оптичних магістралей, проте вони вимагають впровадження складних розгалужувачів із високою асиметрією коефіцієнтів ділення потужності, що суттєво обмежує кінцеву дальність передачі сигналів через високі прохідні втрати.

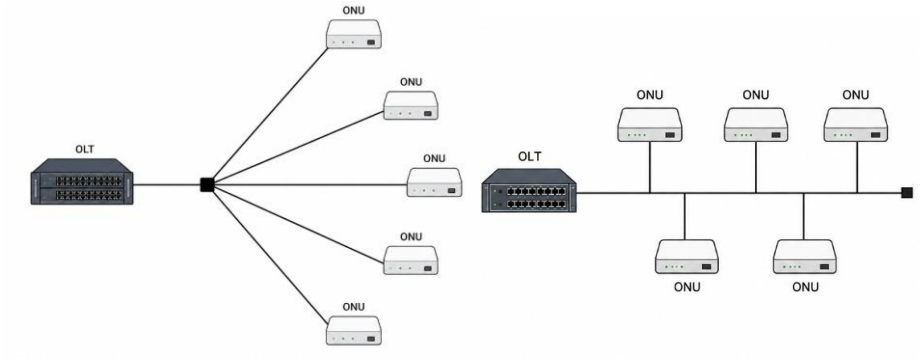


Рисунок 1.3 – Схеми побудови пасивних оптичних мереж за топологіями «зірка» та «шина»

Найбільш універсальним, гнучким та технологічно виправданим рішенням для сучасних селищ та районів приватної забудови є топологія «дерево з пасивним розгалуженням», які покладені в основу стандартів GEPON та детально зображені на рисунку 1.4. Такі архітектури дозволяють одночасно обслуговувати десятки абонентських пристроїв, задіюючи лише один оптичний порт лінійного термінала та одне волокно на головній магістральній ділянці. Завдяки раціональному використанню лінійно-кабельної інфраструктури та скороченню кількості активних приймально-передавальних модулів, деревоподібні структури забезпечують найменшу питому вартість підключень у розрахунку на одного користувача. Крім того, повна відсутність активного обладнання на проміжних розподільчих вузлах пасивного дерева мінімізує витрати на електроживлення та подальше технічне обслуговування, що робить ці топології оптимальним вибором для проєктування телекомунікаційних мереж у приватному секторі [1; 2].

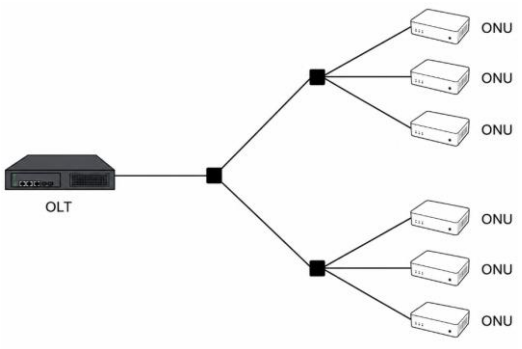


Рисунок 1.4 – Структурна схема деревоподібної топології мережі

1.4 Компоненти пасивних оптичних мереж

Функціонування мереж PON забезпечується злагодженою роботою активного станційного обладнання, абонентських терміналів та комплексу пасивних компонентів, що утворюють оптичні розподільчі мережі (ODN) [1]. Ключовими елементами станційних ділянок є оптичні лінійні термінали (OLT), які зазвичай розміщуються на вузлах зв'язку провайдерів або в приміщеннях АТС. Термінали OLT виконують функції агрегації трафіку з магістральних мереж та його подальшої трансляції у дерева PON, а також здійснюють централізоване управління всіма абонентськими пристроями. Саме на рівні станційних терміналів реалізуються протоколи керування доступом до середовища, що дозволяють уникати колізій при передачі даних від багатьох абонентів до одного порту станції за допомогою механізмів часового мультиплексування (TDMA).

На абонентській стороні розташовуються оптичні мережеві термінали (ONT) або блоки (ONU), які виконують роль кінцевих пристроїв у приватних будинках користувачів або офісах корпоративних клієнтів [3]. Основною задачею цих пристроїв є демультиплексування широкомовних низхідних потоків та виділення інформації, адресованої конкретним абонентам, а також перетворення оптичних сигналів у стандартні електричні інтерфейси Ethernet. Сучасні абонентські термінали можуть бути обладнані не лише портами для передачі даних, а й аналоговими телефонними інтерфейсами (FXS) та виходами для підключення телевізійного обладнання, що дозволяє реалізувати концепцію надання мультисервісних послуг по одному волокну.

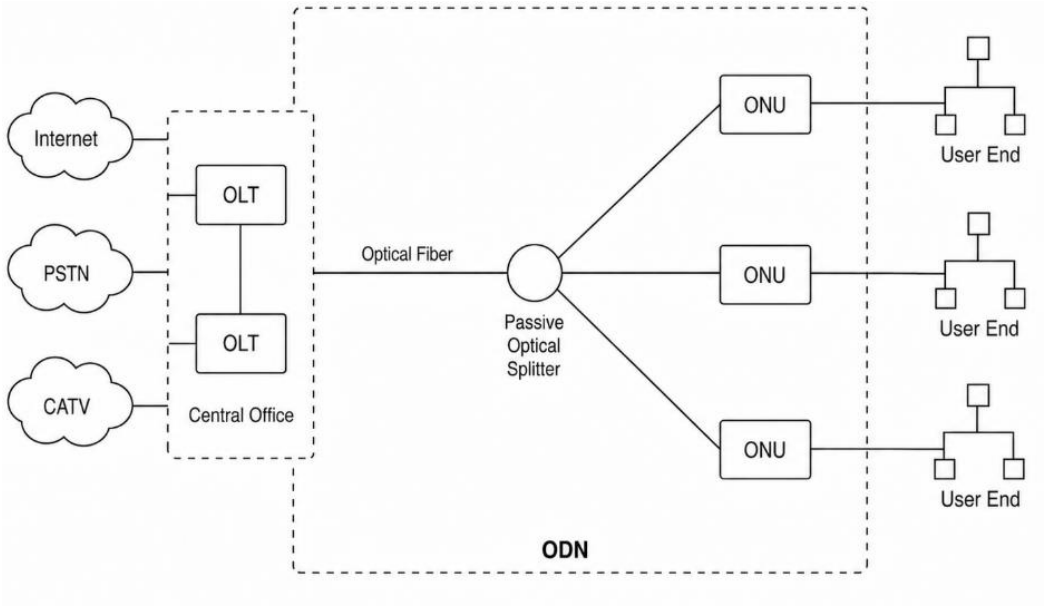


Рисунок 1.5 – Основні структурні компоненти пасивної оптичної мережі

Центральне місце в архітектурах ODN посідають пасивні оптичні розгалужувачі, або сплітери, які забезпечують фізичний поділ потужності світлових сигналів на декілька напрямків без використання електроживлення та активних електронних компонентів. Завдяки компактності та відсутності потреби в обслуговуванні, сплітери можуть розміщуватися на опорах ліній електропередач (стовпах), зовнішніх стінах будинків або у вуличних розподільчих шафах [1]. Ефективність побудови мереж багато в чому залежить від правильно обраних коефіцієнтів розгалуження, які можуть варіюватися від 1:2 до 1:64, забезпечуючи підключення значної кількості користувачів за умови дотримання розрахованих енергетичних бюджетів.

Важливими допоміжними компонентами є хвильові мультиплексори WDM, які інтегруються безпосередньо в OLT та ONT для розділення вхідних і вихідних потоків на різних довжинах хвиль: 1490 нм для низхідного трафіку та 1310 нм для висхідного. Крім того, до пасивної інфраструктури відносяться оптичні кроси (ODF), муфти та кабельні збірки, які забезпечують надійність механічних з'єднань та захист волокон від зовнішніх впливів. Використання виключно пасивних елементів між станціями та абонентами значно знижує

ймовірність відмов, спричинених перебоями в електропостачанні на проміжних вузлах, що істотно підвищує загальну живучість проєктованих систем [2].

1.5 Моделювання телекомунікаційних мереж PON та системи автоматизованого проєктування

Проєктування сучасних мультисервісних мереж доступу вимагає попередньої оцінки їхньої ефективності, надійності та працездатності ще до етапу фізичного розгортання лінійно-кабельних споруд в умовах об'єкта проєктування. Для вирішення цих інженерних задач застосовують методи моделювання телекомунікаційних мереж, які дозволяють детально дослідити поведінку складних систем при різних архітектурних конфігураціях обладнання та варіюванні щільності абонентів. Сучасні підходи до моделювання пасивних оптичних мереж (PON) за своєю специфікою поділяються на два основні класи: аналітичні та імітаційні.

Аналітичне моделювання базується на використанні класичного математичного апарату, зокрема теорій масового обслуговування, теорій графів та ймовірнісних методів. Цей вид моделювання дозволяє отримати точні аналітичні розрахунки ключових фізичних параметрів оптичних розподільчих мереж (ODN), таких як оптичні бюджети потужності, сумарні коефіцієнти затухання у волокнах, а також втрати на пасивних компонентах (зварювальних з'єднаннях та розгалужувачах) [2]. Для проведення таких розрахунків використовують спеціалізовані утиліти (наприклад, програмні комплекси типу PON-calculator або інструменти Fiber Optic Calculator), що дозволяють оперативно прогнозувати затухання в лініях зв'язку.

Імітаційне моделювання (симуляція) застосовується для дослідження складних динамічних процесів у мережах, які неможливо описати статичними математичними формулами через випадковий характер надходження пакетів даних. У мережах GEPON імітаційне моделювання є єдиним інструментом для детального тестування алгоритмів динамічного розподілу смуги пропускання

(DBA) та оцінки параметрів якості обслуговування (QoS). Використовуючи спеціалізовані середовища симуляції (наприклад, NS-3 або OMNeT++), проєктувальники мають можливість створити віртуальну модель дерева PON із заданою кількістю абонентських терміналів та перевірити логіку роботи механізмів пріоритезації трафіку в моменти пікових навантажень.

Окремим пріоритетним напрямком у сучасній інженерній практиці є впровадження хмарних систем автоматизованого проєктування (САПР), які поєднують у собі елементи аналітичного моделювання та геоінформаційних систем (ГІС). Яскравим прикладом інструменту такого класу є інтерактивний пакет Netcalc (проєкт компанії «Інкаб») [5]. Загальний інтерфейс зазначеного програмного комплексу та приклад картографічного розбиття території проєктування наведено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Інтерфейс та приклад моделювання мережі FTTH у програмному пакеті NetCalc

Програмний комплекс Netcalc дозволяє автоматизувати значну частину рутинної роботи інженера під час проєктування повітряних мереж у приватному секторі, використовуючи як вхідні дані гео-мітки будинків та опор ліній електропередач. Система самостійно зчитує координати об'єктів, здійснює

автоматичне трасування кабельних ліній, розраховує специфікації матеріалів і формує ескізний проєкт мережі.

Аналогічні можливості автоматизації інженерних розрахунків та підбору обладнання демонструє хмарний онлайн-конфігуратор типу Vols.expert [6], процес побудови пасивної схеми абонентського доступу в якому зображено на рисунку 1.7.

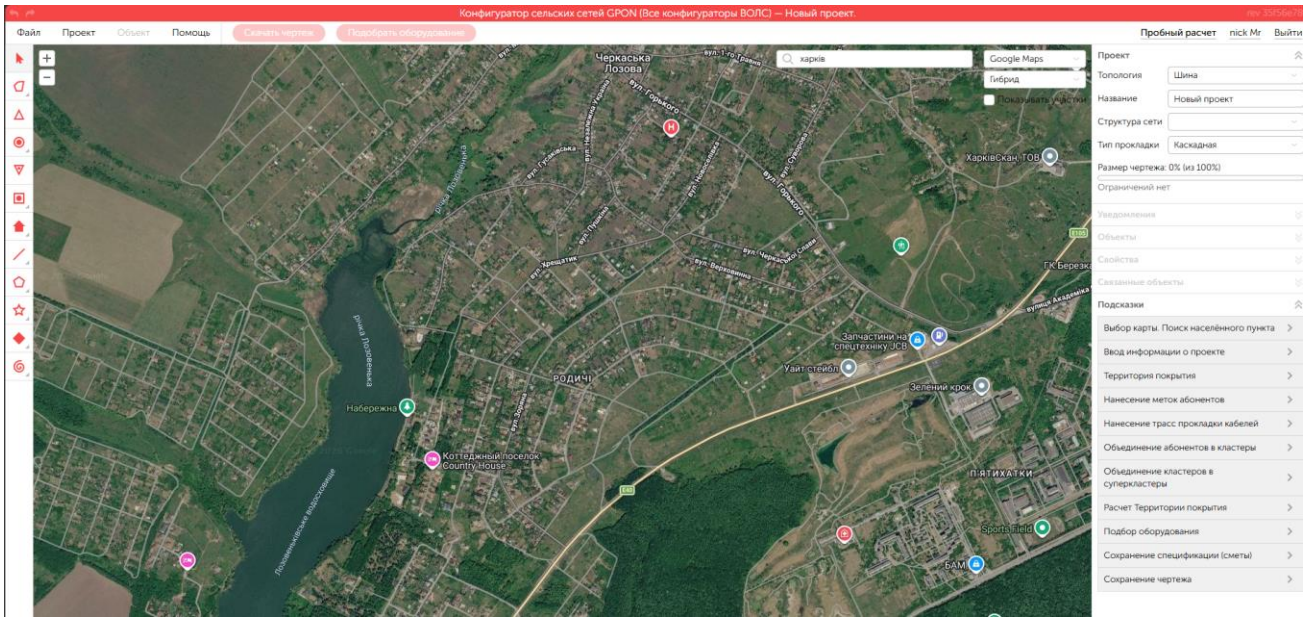


Рисунок 1.7 – Інтерфейс онлайн-конфігуратора Vols.expert під час формування проєктної зони мережі FTTH

Програма Vols.expert дозволяє оперативно скласти детальну схему пасивної мережі безпосередньо по інтерактивній веб-карті, автоматично підібрати оптимальні номінали оптичних сплітерів, ємності відгалужувальних муфт і кросового обладнання, а також виконати розрахунок оптичного бюджету затухання. Кінцеві результати моделювання в таких САПР легко експортуються у формати CAD для подальшого графічного оформлення робочих креслень. Таким чином, комплексне впровадження систем автоматизованого проєктування (таких як Netcalc та Vols.expert) дозволяє зменшити ризики інженерних помилок, оптимізувати капітальні витрати та значно прискорити підготовку проєктної документації [5; 6].

Висновки до розділу 1

Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку телекомунікаційних мереж дозволяє стверджувати, що традиційні технології абонентського доступу на базі мідних кабелів зв'язку повністю вичерпали свій модернізаційний потенціал і не здатні задовольнити зростаючі потреби споживачів у пропускній здатності. Масовий перехід до повністю оптичних архітектур FTTH є закономірним інженерним етапом еволюції, що дозволяє усунути обмеження «останньої милі» та забезпечити доставку мультисервісних послуг на гігабітних швидкостях.

У ході порівняльного аналізу архітектурних рішень було технічно обґрунтовано, що найбільш ефективною для умов приватної забудови є топологія «дерево з пасивним розгалуженням» (P2MP) [1]. Вона забезпечує максимальну економію волоконно-оптичного ресурсу розподільчих кабелів та дозволяє скоротити кількість дороговартісних приймально-передавальних модулів на станційній стороні. Відсутність активного комутаційного обладнання на проміжних вузлах пасивного дерева суттєво підвищує надійність, довговічність та енергонезалежність проєктованих систем.

На основі детального зіставлення стандартів пасивних оптичних мереж для реалізації проєкту було обрано технологію GEPON (стандарт IEEE 802.3ah) [3]. Вибір цього стандарту обумовлений його повною орієнтованістю на протокол Ethernet, симетричною швидкістю передачі даних (1,25 Гбіт/с в обох напрямках) та відсутністю складної інкапсуляції кадрів, що значно знижує капітальні витрати на придбання обладнання та спрощує подальше адміністрування мереж. Встановлено склад основних технічних компонентів системи, де використання спектрального ущільнення WDM на довжинах хвиль 1310/1490 нм дозволяє організувати повнодуплексний обмін інформацією по одному оптичному волокну.

Розгляд сучасних методологій проєктування продемонстрував, що створення надійних телекомунікаційних інфраструктур неможливе без застосування методів моделювання мереж. Комплексне поєднання аналітичного моделювання (для оцінки енергетичних бюджетів ліній) та імітаційного

моделювання (для тестування алгоритмів динамічного розподілу смуги пропускання DBA) дозволяє оптимізувати параметри мереж ще до початку будівельних робіт. Використання сучасних хмарних систем автоматизованого проєктування та інтерактивних конфігураторів (таких як Netcalc та Vols.expert) дозволяє автоматизувати розбивку територій на кластери, прискорити підбір пасивних компонентів та зменшити ризики інженерних помилок [5; 6].

Таким чином, сформована теоретична база, обґрунтовані технологічні стандарти та визначені програмні інструменти моделювання створюють цілісний інженерний фундамент для переходу до практичної частини проєктування лінійно-кабельної інфраструктури конкретного об'єкта.

2 РОЗРОБКА ЛІНІЙНО-КАБЕЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖІ

2.1 Архітектурно-планувальна характеристика котеджного селища

Проєктування лінійно-кабельної інфраструктури пасивної оптичної мережі доступу безпосередньо залежить від планувальної структури території, щільності розміщення будинків, наявності існуючої опорної інфраструктури та очікуваного характеру споживання телекомунікаційних послуг. У межах цієї роботи об’єктом проєктування обрано окремий абонентський кластер котеджного селища «Родичі», розташованого у Харківській області.

Оглядова карта обраної проєктної зони наведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Оглядова карта проєктної зони котеджного селища «Родичі» з позначенням потенційних абонентів

На рисунку 2.1 показано виділену проєктну зону котеджного селища «Родичі», у межах якої передбачається побудова пасивної оптичної мережі доступу. Обрана територія охоплює частину селища з приватною котеджною забудовою та використовується як окремий абонентський кластер для подальшого проєктування мережі.

Повна територія селища має більшу площу та включає значну кількість житлових ділянок, тому в межах дипломного проєкту розглядається не все селище, а окрема проєктна зона, яка може бути реалізована як перша черга розгортання мережі широкосмугового доступу. Такий підхід є доцільним з інженерної точки зору, оскільки дозволяє зменшити масштаб початкового будівництва, оптимізувати витрати на лінійно-кабельну інфраструктуру та забезпечити поетапне підключення абонентів.

До складу обраної проєктної зони включено три суміжні вулиці з приватною котеджною забудовою. На кожній вулиці передбачається підключення 24 приватних будинків. Таким чином, загальна кількість потенційних абонентів у межах проєктної зони становить:

$$N = 72 \text{ абоненти.}$$

Виділення трьох вулиць є зручним для подальшого проєктування, оскільки кожна вулиця може розглядатися як окрема абонентська група, що обслуговується окремою PON-гілкою. Це дозволяє рівномірно розподілити абонентське навантаження між трьома напрямками мережі та спростити подальше трасування оптичних кабелів.

Характер житлової забудови обраної ділянки представлений приватними будинками котеджного типу, розрахованими переважно на проживання однієї сім’ї. Для подальших розрахунків приймається, що один приватний будинок відповідає одній абонентській точці підключення. У кожному будинку передбачається встановлення абонентського оптичного термінала ONU/ONT, який підключається до домашнього Wi-Fi маршрутизатора. Через маршрутизатор доступ до мережі отримують користувацькі пристрої мешканців будинку.

Для подальшого розрахунку інформаційного навантаження приймається типовий склад пристроїв одного домогосподарства, наведений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Типовий склад обладнання та користувацьких пристроїв одного домогосподарства

Тип пристрою	**Кількість пристроїв на одне домогосподарство**	**Загальна кількість пристроїв для 72 домогосподарств**
Абонентський термінал ONU/ONT	1	72
Wi-Fi маршрутизатор	1	72
Смартфони	4	288
Ноутбуки або персональні комп’ютери	2	144
Smart TV або IPTV-приставки	2	144
Планшет	1	72
Ігрова консоль або мультимедійний пристрій	1	72
Разом	12	864

Загальна кількість пристроїв, підключених до мережі в межах проєктної зони, становить 864 одиниці. При цьому ONU/ONT і Wi-Fi маршрутизатор належать до мережевого обладнання абонентської сторони, а основне користувацьке навантаження створюють смартфони, ноутбуки, персональні комп’ютери, телевізори Smart TV, IPTV-приставки, планшети та ігрові пристрої. Кількість користувацьких пристроїв, які безпосередньо формують інформаційне навантаження, становить 10 одиниць на одне домогосподарство. Для всієї проєктної зони така кількість становить:

$$N_{пр} = 72 \cdot 10 = 720 \text{ пристроїв.}$$

Основними сервісами, які формують навантаження на мережу, є веб-серфінг, соціальні мережі, месенджери, потокове відео HD/4K, IPTV, відеоконференції, дистанційна робота та навчання, онлайн-ігри, хмарні сервіси і

завантаження великих файлів. Низькоінтенсивний фоновий трафік окремо не виділяється, оскільки його обсяг є незначним порівняно з мультимедійними сервісами та враховується у складі загального інтернет-трафіку домогосподарства.

З урахуванням котеджного типу забудови та підвищених вимог до якості послуги для кожного абонента передбачається надання широкосмугового доступу до мережі Інтернет зі швидкістю до 1 Гбіт/с. Така швидкість є актуальною для сучасних домогосподарств, у яких одночасно використовується декілька пристроїв і сервісів, зокрема потокове відео високої чіткості, відеоконференції, онлайн-ігри, хмарні сервіси, дистанційна робота та навчання.

При розрахунку навантаження необхідно враховувати, що заявлена швидкість тарифного плану до 1 Гбіт/с не означає постійного одночасного використання максимальної швидкості всіма абонентами. У пасивних оптичних мережах доступу використовується принцип статистичного мультиплексування, за якого загальна смуга пропускання PON-гілки розподіляється між активними користувачами залежно від поточного навантаження. Тому подальший розрахунок виконується з урахуванням коефіцієнтів одночасності для вечірнього пікового періоду, коли активність користувачів у житловому секторі є найбільшою.

Важливим фактором для подальшого трасування мережі є наявність уздовж проєктної зони існуючих повітряних ліній електропередач напругою 0,4 кВ, виконаних на залізобетонних опорах. Використання наявних опор дозволяє організувати прокладання волоконно-оптичних кабелів методом повітряного підвісу без виконання дорогих земляних робіт. Такий спосіб будівництва є доцільним для приватного сектору, оскільки зменшує вартість реалізації проєкту, скорочує терміни монтажу та забезпечує зручний доступ до лінійно-кабельної інфраструктури під час експлуатації.

Кліматичні умови Харківського регіону також впливають на вибір типу кабелю та способу його монтажу. Для місцевості характерні сезонні коливання температури, вітрові навантаження та можливість утворення ожеледі в зимовий

період. У зв’язку з цим для повітряного прокладання доцільно використовувати самонесучі діелектричні оптичні кабелі, стійкі до розтягувальних навантажень, ультрафіолетового випромінювання та зовнішніх атмосферних впливів.

Таким чином, вихідними даними для подальшого проєктування є абонентський кластер ємністю 72 домогосподарства, розміщений у межах трьох суміжних вулиць, типовий склад одного домогосподарства з 12 підключеними пристроями, орієнтація на надання гігабітного доступу до мережі Інтернет, використання наявної опорної інфраструктури для повітряного підвісу кабелю та необхідність забезпечення стабільної роботи мережі в умовах вечірнього пікового навантаження. На основі цих даних у наступному підрозділі виконується розрахунок очікуваного інформаційного навантаження та обґрунтовується структура мережі.

2.2 Розрахунок навантаження мережі та обґрунтування структурної схеми

Розрахунок навантаження мережі виконується на основі прийнятих у попередньому підрозділі вихідних даних щодо кількості абонентських підключень і типового складу обладнання одного домогосподарства. Метою розрахунку є визначення очікуваного пікового навантаження та обґрунтування кількості PON-гілок, необхідних для стабільної роботи мережі.

Відповідно до прийнятої моделі абонента, у кожному домогосподарстві передбачається 12 підключених пристроїв, з яких 10 пристроїв безпосередньо формують користувацьке навантаження.

Наявність значної кількості пристроїв у кожному домогосподарстві не означає, що всі вони одночасно створюють максимальне навантаження на мережу. Тому розрахунок виконується не за максимально можливою кількістю підключених пристроїв, а за основними типами сервісів, які використовуються абонентами. До таких сервісів належать веб-серфінг, соціальні мережі, потокове відео, IPTV, відеоконференції, онлайн-ігри, хмарні сервіси та завантаження великих файлів.

Під час розрахунку враховується, що тарифна швидкість до 1 Гбіт/с є максимально можливою швидкістю доступу для окремого абонента, а не постійним навантаженням, яке одночасно створюють усі користувачі мережі. Тому оцінка пікового трафіку виконується з урахуванням коефіцієнтів одночасності для різних типів сервісів.

Також необхідно враховувати, що для технології GEPON швидкість 1,25 Гбіт/с на один PON-порт є номінальною лінійною швидкістю передавання. Фактична корисна пропускна здатність для абонентського трафіку є меншою через службові та протокольні накладні витрати. Тому під час проєктування доцільно не використовувати ресурс PON-порту на граничному рівні, а передбачати експлуатаційний запас пропускної здатності.

Найбільше навантаження в житловому секторі характерне для вечірнього періоду, коли користувачі одночасно переглядають потокове відео, користуються соціальними мережами, виконують дистанційну роботу або навчання, здійснюють відеодзвінки, грають в онлайн-ігри та завантажують великі файли. Тому розрахунок виконується саме для вечірнього пікового періоду.

Для оцінки пікового навантаження використовується коефіцієнт одночасності, який показує, яка частина абонентських підключень одночасно використовує певний тип сервісу. У цьому розрахунку один абонент відповідає одному домогосподарству. Кількість активних абонентів для кожного виду послуги визначається за формулою:

$$Ni = N \cdot Ci / 100,$$

де Ni — кількість активних абонентів, що одночасно використовують і-й тип сервісу;

N — загальна кількість абонентів у проєктній зоні;

Ci — коефіцієнт одночасності для і-го типу сервісу, %.

Сумарне навантаження для кожного виду сервісу визначається за формулою:

$Pi = Ni \cdot Vi,$

де Pi — сумарне навантаження і-го виду сервісу, Мбіт/с;

Vi — середня швидкість передавання даних для одного активного абонента, Мбіт/с.

У розрахунку використовується кількість абонентів, визначена в підрозділі 2.1. Оскільки оцінка виконується для вечірнього пікового періоду, коефіцієнти одночасності приймаються підвищеними порівняно із середньодобовим навантаженням. Результати розрахунку наведено в таблиці 2.2.

Кількість активних абонентів у таблиці округлюється до найближчого цілого значення, оскільки фактична кількість користувачів не може бути дробовою.

Таблиця 2.2 — Розрахунок пікового інформаційного навантаження мережі

Тип сервісу	**Орієнтовна швидкість на одного активного абонента, Мбіт/с**	**Коефіцієнт одночасності Ci, %**	**Кількість активних абонентів Ni**	**Сумарне навантаження, Мбіт/с**
Веб-серфінг, соціальні мережі, месенджери	15	75	54	810
Потокове відео HD/4K та IPTV	20	55	40	800
Відеоконференції, дистанційна робота та навчання	6	20	15	90
Онлайн-ігри та інтерактивні сервіси	3	20	15	45
Завантаження великих файлів, оновлення ПЗ, хмарні сервіси	80	10	8	640
IP-телефонія та голосові сервіси	0,128	15	11	1,41
Разом	—	—	—	2386,41

За результатами розрахунку пікове користувацьке навантаження для всього абонентського кластера становить приблизно 2386,41 Мбіт/с. Для врахування службового трафіку, протокольних накладних витрат, резерву на короткочасні сплески активності та можливих похибок прогнозування доцільно прийняти додатковий запас на рівні 10%.

Тоді розрахункове пікове навантаження мережі становитиме:

$$Pрозр = 2386{,}41 \cdot 1{,}1 = 2625{,}05 \text{ Мбіт/с.}$$

Отже, для подальшого проєктування приймається розрахункове пікове навантаження абонентського кластера:

$$Р_{розр} \approx 2{,}63 \text{ Гбіт/с}.$$

На наступному етапі визначається доцільна кількість PON-гілок з урахуванням розрахункового навантаження, номінальної швидкості PON-порту та необхідного експлуатаційного запасу пропускної здатності. Використання однієї PON-гілки є недоцільним, оскільки сумарний трафік перевищує номінальну пропускну здатність одного PON-порту. Поділ мережі на дві PON-гілки також не забезпечує достатнього запасу для стабільної роботи у вечірній піковий період.

Тому для проєктованої мережі приймається використання трьох окремих PON-гілок. У цьому випадку розрахункове пікове навантаження на одну гілку становить:

$$Р_{гілки} = 2{,}63 / 3 = 0{,}88 \text{ Гбіт/с}.$$

Отримане значення є нижчим за номінальну лінійну швидкість одного GEPON-порту 1,25 Гбіт/с і залишає експлуатаційний запас. Запас відносно номінальної лінійної швидкості становить:

$$Р_{зап} = 1{,}25 - 0{,}88 = 0{,}37 \text{ Гбіт/с}.$$

Відносне завантаження одного PON-порту становить:

$$К_{зав} = 0{,}88 / 1{,}25 \cdot 100\% \approx 70{,}4\%.$$

З урахуванням того, що фактична корисна пропускна здатність є меншою за номінальну лінійну швидкість, прийняте завантаження не повинно наближатися до 100%. Отримане значення близько 70% є прийнятним для мережі

доступу, орієнтованої на стабільну роботу в умовах вечірнього пікового навантаження.

Структурно-топологічна схема проєктованої мережі наведена на рисунку 2.2. Вона відображає деревоподібну топологію пасивної оптичної мережі типу “точка — багато точок”, характерну для технології GEPON. Центральним вузлом мережі є станційний термінал OLT, від якого організовано три окремі PON-гілки. Детальне розміщення розподільчих PON-боксів і абонентських дроп-кабелів визначається під час трасування мережі та наведене в підрозділі 2.4.

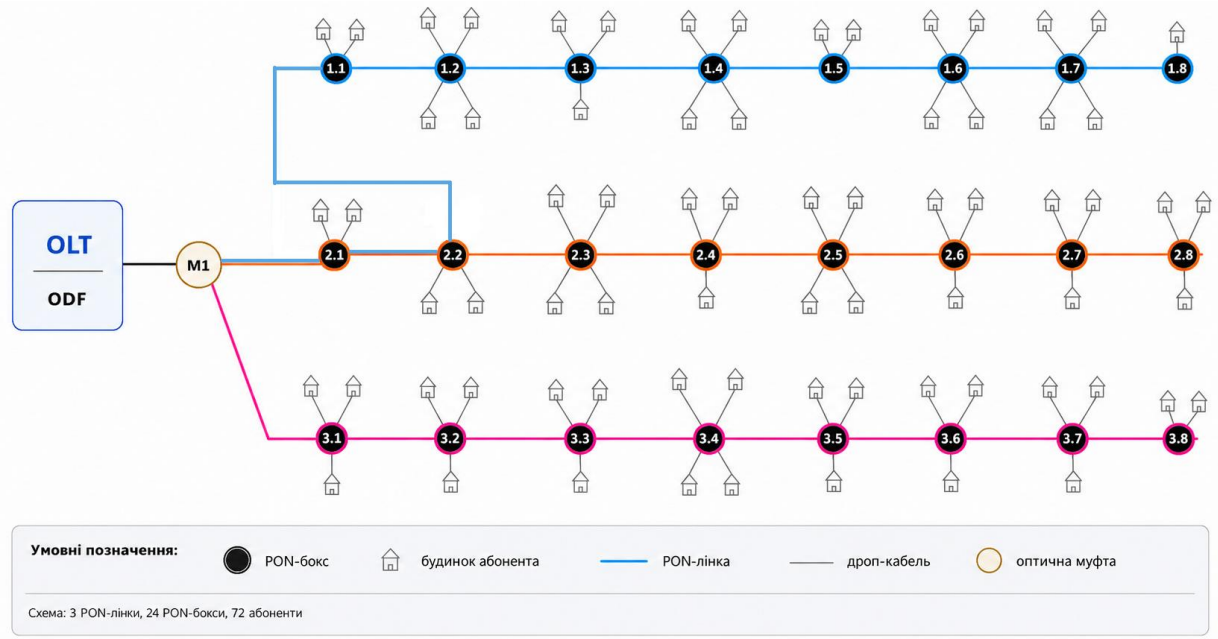


Рисунок 2.2 – Структурно-топологічна схема організації абонентського доступу в проєктній зоні

На схемі показано розподіл абонентських будинків між PON-боксами відповідно до фактичного розташування будинків у проєктній зоні. Кожна PON-гілка обслуговує 24 будинки, однак кількість абонентів, підключених до окремого PON-бокса, є різною і становить від одного до чотирьох підключень. Такий розподіл дозволяє розміщувати PON-бокси поблизу локальних груп будинків і зменшити довжину абонентських дроп-кабелів.

Поділ мережі на три PON-гілки є зручним з точки зору розподілу абонентського навантаження та подальшого обслуговування. Кожна PON-гілка

залишається окремим логічним напрямком від відповідного PON-порту OLT. Водночас фізичне прокладання кабелю виконується з урахуванням фактичного розташування вулиць і опорної інфраструктури. На початковій ділянці волокна PON-1 і PON-2 проходять спільною трасою до бокса 2.1. Далі волокно PON-1 проходить транзитом через ділянку 2.1–2.2 і в боксі 2.2 відводиться до бокса 1.1. Таке рішення дозволяє використати спільну кабельну ділянку та не прокладати два паралельні кабелі на одних і тих самих опорах.

Для кожної PON-гілки приймається каскадна схема пасивного розгалуження на основі PLC-сплітерів 1:8 та 1:4. У такому випадку проєктна ємність однієї PON-гілки становить:

$$N_{пр} = 8 \cdot 4 = 32 \text{ підключення.}$$

Фактично в межах однієї PON-гілки використовується 24 абонентські підключення, тому резерв ємності становить:

$$N_{рез} = 32 - 24 = 8 \text{ підключень.}$$

Відносний резерв ємності однієї PON-гілки дорівнює:

$$K_{рез} = 8 / 32 \cdot 100\% = 25\%.$$

Наявність такого резерву є доцільною, оскільки дозволяє підключати додаткових абонентів або виконувати незначні зміни у схемі розподілу без перебудови всієї PON-гілки. Таким чином, прийнята структура мережі забезпечує не лише поточне підключення абонентів, а й можливість подальшого розвитку мережі.

2.3 Вибір та обґрунтування мережевого обладнання

Вибір активного та пасивного обладнання виконується на основі прийнятої структури мережі, розрахованого інформаційного навантаження та вимог до

побудови лінійно-кабельної інфраструктури. У даному підрозділі визначаються основні типи обладнання, їх призначення та технічні вимоги, необхідні для реалізації проєктованої мережі. Детальне розміщення розподільчих PON-боксів розглядається в підрозділі 2.4.

До складу обладнання проєктованої мережі входять активні та пасивні компоненти. До активного обладнання належать станційний оптичний лінійний термінал OLT та абонентські оптичні термінали ONU/ONT. До пасивних компонентів належать оптичні розподільчі кроси, волоконно-оптичні кабелі, PLC-сплітери, оптичні муфти, PON-бокси, патчкорди, пігтейли, адаптери, а також монтажна арматура для повітряного підвісу кабелю.

Для встановлення на станційному вузлі оператора обирається оптичний лінійний термінал OLT стандарту GEPON, який забезпечує централізоване керування абонентськими терміналами, агрегацію трафіку та розподіл смуги пропускання між користувачами. Оскільки в проєкті передбачено три незалежні PON-гілки, OLT повинен мати не менше чотирьох PON-портів. Три порти використовуються для підключення робочих гілок мережі, а один порт залишається резервним для подальшого розширення або оперативної заміни у разі необхідності.

З урахуванням того, що в проєкті використовується три PON-гілки, станційний термінал OLT повинен мати uplink-інтерфейси з достатньою сумарною пропускною здатністю для передавання агрегованого трафіку до мережі оператора. Використання лише одного uplink-порту 1 Гбіт/с є недоцільним, оскільки він може стати вузьким місцем для всієї мережі. Тому доцільно застосовувати OLT із високошвидкісним uplink-портом 10 Гбіт/с або з декількома гігабітними uplink-портами, які можуть використовуватися для агрегації каналів.



Рисунок 2.3 – Приклад станційного оптичного лінійного термінала OLT, GEPON PON-модуля класу PX20 та uplink-модуля SFP+

Для підключення OLT до мережі агрегації провайдера можуть використовуватися uplink-інтерфейси на базі змінних оптичних модулів SFP або SFP+. У межах даного проєкту доцільним є використання uplink-інтерфейсу SFP+ 10G, оскільки сумарний трафік від трьох PON-гілок може перевищувати пропускну здатність одного гігабітного інтерфейсу. Це дозволяє уникнути вузького місця на стороні станційного обладнання та забезпечити передавання агрегованого трафіку до вищого рівня мережі провайдера.

Для організації абонентських PON-гілок у складі OLT використовуються оптичні PON-модулі стандарту GEPON. У межах даної роботи як розрахунковий приймається модуль класу PX20, призначений для роботи на відстані до 20 км, з допустимим оптичним бюджетом 24 дБ [8]. Саме це значення використовується під час перевірки працездатності оптичної розподільчої мережі між PON-портом OLT та абонентськими терміналами ONU/ONT. Водночас модулі SFP/SFP+ для uplink-з’єднання OLT з мережею агрегації провайдера виконують іншу функцію і не використовуються для розрахунку оптичного бюджету абонентської PON-гілки.

Кожен PON-порт OLT у проєктованій мережі формує окрему абонентську PON-гілку, тобто одному PON-порту відповідає одна гілка доступу. Передавання даних у GEPON-мережі здійснюється оптичним сигналом: у низхідному напрямку від OLT до ONU/ONT використовується довжина хвилі 1490 нм, а у висхідному напрямку від ONU/ONT до OLT — 1310 нм. Номінальна швидкість передавання одного GEPON-порту становить 1,25 Гбіт/с, а оцінка можливості роботи гілки виконується за допустимим оптичним бюджетом мережі.

На абонентській стороні в кожному приватному будинку встановлюється оптичний мережевий термінал ONU/ONT. Основним завданням цього пристрою є приймання оптичного сигналу з мережі PON, перетворення його в електричний Ethernet-сигнал та передавання даних до домашнього маршрутизатора або локальної мережі абонента. Оскільки для котеджного селища передбачається надання тарифної швидкості до 1 Гбіт/с, абонентський термінал повинен мати не менше одного порту Gigabit Ethernet 10/100/1000Base-T. Використання пристроїв із портом Fast Ethernet є недоцільним, оскільки вони обмежували б швидкість доступу значенням 100 Мбіт/с і не відповідали б вимогам проєкту.

Загальна кількість абонентських ONU/ONT визначається кількістю запланованих абонентських підключень у межах проєктної зони. Для кожного будинку передбачається встановлення одного абонентського термінала. Додатково доцільно закласти невеликий експлуатаційний резерв обладнання для оперативної заміни у разі несправностей або підключення нових абонентів.



Рисунок 2.4 – Абонентський оптичний мережевий термінал ONU/ONT

Фізичне розгалуження оптичного сигналу в мережі виконується за допомогою пасивних оптичних PLC-сплітерів. Для кожної з трьох PON-гілок приймається каскадна схема розгалуження із сумарною проєктною ємністю до 32 абонентських підключень. Така ємність є достатньою, оскільки фактично на кожній PON-гілці передбачається підключення 24 домогосподарства, а решта ємності залишається резервною для подальшого розвитку мережі.

У проєкті використовуються PLC-сплітери 1:8 та 1:4. Сплітери 1:8 застосовуються для формування групових напрямків у межах PON-гілки, а сплітери 1:4 — для підключення локальних груп абонентів у місцях розміщення розподільчих PON-боксів. При цьому PON-бокс розглядається як фізична точка підключення абонентських дроп-кабелів, у якій можуть розміщуватися сплітери, зварні з’єднання або комутаційні елементи.

Кількість фізичних PON-боксів не слід безпосередньо ототожнювати з кількістю сплітерів. Розміщення PON-боксів визначається результатами трасування, фактичним положенням будинків і опор, а також необхідністю зменшення довжини абонентських дроп-кабелів. Тому в межах проєкту кількість PON-боксів визначається окремо під час трасування, а сплітери 1:8 та 1:4 розглядаються як пасивні елементи, що забезпечують необхідний коефіцієнт розгалуження PON-гілки.



Рисунок 2.5 – Приклад планарного оптичного розгалужувача PLC

Для організації магістральних і розподільчих ділянок мережі обирається одномодовий волоконно-оптичний кабель, призначений для зовнішнього повітряного прокладання. З урахуванням використання існуючих опор ліній електропередач доцільним є застосування самонесучого діелектричного оптичного кабелю типу ADSS. Такий кабель не містить металевих елементів, має

достатню механічну міцність для підвісу між опорами та стійкий до впливу атмосферних чинників.

На магістральній ділянці від станційного вузла до проєктної зони доцільно використовувати одномодовий оптичний кабель із запасом волокон. У межах даного проєкту задіюються три робочі волокна, кожне з яких відповідає окремій PON-гілці. При цьому фізичне прокладання робочих волокон виконується з урахуванням оптимізації кабельної траси. На початковій ділянці волокна PON-1 і PON-2 проходять спільною трасою до бокса 2.1. У боксі 2.1 волокно PON-2 використовується для формування другої PON-гілки, а волокно PON-1 проходить транзитом через ділянку 2.1–2.2 і в боксі 2.2 відводиться до бокса 1.1. Це дозволяє зменшити кількість кабельних ліній, підвішених на одних і тих самих опорах. Інші волокна магістрального кабелю в межах цієї роботи не деталізуються та можуть розглядатися як технологічний резерв для подальшого розвитку мережі селища або аварійного перемикання. На розподільчих ділянках після PLC-сплітерів 1:8 застосовуються 8-волоконні кабелі, оскільки кожен вихід сплітера відповідає окремому волокну, що підводиться до відповідного PON-бокса.

Особливістю розподільчої ділянки між боксами 2.1 та 2.2 є використання одного 8-волоконного кабелю не лише для продовження напрямків PON-2, а й для транзитного проходження волокна PON-1. У боксі 2.1 волокно PON-1 не підключається до сплітера PON-2, а проходить транзитом по першому волокну кабелю до бокса 2.2. У боксі 2.2 це волокно відводиться до бокса 1.1, де формується розгалуження першої PON-гілки.

Для безпосереднього підключення будинків від найближчих PON-боксів використовуються абонентські дроп-кабелі. Вони повинні бути придатними для зовнішнього прокладання, мати стійку до ультрафіолетового випромінювання оболонку та силові елементи, які забезпечують механічну міцність під час повітряного введення кабелю до будинку. У кожний котедж заводиться окреме волокно, яке підключається до абонентського термінала ONU/ONT.

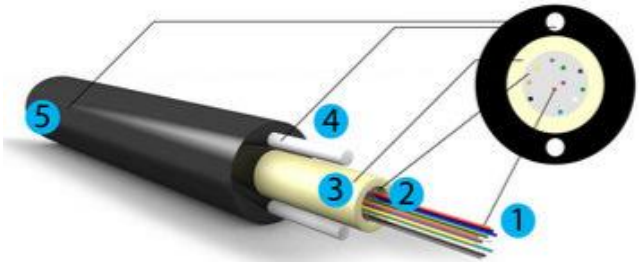


Рисунок 2.6 – Конструкція самонесучого оптичного кабелю та абонентського дроп-кабелю

На рисунку 2.6 цифрами позначено основні елементи конструкції оптичного кабелю: 1 – оптичні волокна; 2 – гідрофобний заповнювач; 3 – буферний модуль, у якому розміщуються оптичні волокна; 4 – армувальні силові елементи кабелю; 5 – зовнішня поліетиленова оболонка.

Розподільчі PON-бокси використовуються як точки підключення абонентських дроп-кабелів до розподільчої оптичної мережі. Вони встановлюються на опорах поблизу локальних груп будинків і забезпечують зручне підключення абонентів та доступ до з’єднань під час обслуговування. Оскільки PON-бокси розміщуються на відкритому повітрі, їхні корпуси повинні мати герметичне виконання та клас захисту не нижче IP65.

Кількість і місця встановлення розподільчих PON-боксів визначаються за результатами трасування мережі з урахуванням розташування будинків та опорної інфраструктури. Детальний розподіл PON-боксів і абонентських підключень наведено в підрозділі 2.4.



Рисунок 2.7 – Приклад вуличного PON-бокса

Для захисту зварних з’єднань, організації переходів між кабелями та розподілу волокон використовуються оптичні муфти. У муфтах або розподільчих боксах виконується зварювання волокон магістрального, розподільчого та абонентського кабелю. На станційній стороні застосовується оптичний розподільчий крос ODF, який забезпечує впорядковане введення кабелю, захист зварних з’єднань і комутацію волокон із PON-портами OLT за допомогою оптичних патчкордів.

У проєктованій мережі муфта M1 використовується як точка входу магістрального кабелю в абонентський кластер і місце розподілу робочих волокон між трьома PON-гілками.



Рисунок 2.8 – Приклад оптичної муфти для зовнішнього монтажу

Окрему групу обладнання становлять монтажні елементи для повітряного підвісу кабелю. До них належать натяжні та підтримуючі затискачі, бандажна стрічка, кронштейни, гаки, анкерні елементи та пристрої для фіксації технологічного запасу кабелю. На опорах, де встановлюються розподільчі бокси або виконуються відгалуження, передбачається залишення технологічного запасу кабелю довжиною 10–15 м. Такий запас дозволяє виконувати монтажні та ремонтні роботи без надмірного натягу кабелю і без необхідності заміни ділянки лінії.

Обраний склад обладнання відповідає прийнятій деревоподібній структурі мережі GEPON типу “точка — багато точок”. Використання OLT із резервом PON-портів, каскадної схеми пасивного розгалуження на основі PLC-сплітерів 1:8 та 1:4, самонесучих оптичних кабелів і герметичних вуличних PON-боксів дозволяє реалізувати масштабовану та зручну в експлуатації мережу FTTH для котеджного селища.

2.4 Проєктування трас прокладання оптичного кабелю

Проєктування трас прокладання волоконно-оптичного кабелю в межах обраного абонентського кластера котеджного селища «Родичі» виконується на основі прийнятої структури пасивної оптичної мережі GEPON. Основною метою трасування є вибір раціональних маршрутів кабельних ліній, розміщення розподільчих PON-боксів поблизу локальних груп абонентів та використання наявної опорної інфраструктури для повітряного підвісу кабелю.

Відповідно до прийнятої структури мережі кожна PON-гілка розглядається як окремий логічний напрямок від відповідного PON-порту OLT. Водночас фізичне прокладання кабелю виконується з урахуванням фактичного розташування вулиць і опорної інфраструктури, тому на окремих ділянках волокна різних PON-гілок можуть проходити спільною трасою в одному кабелі. Зокрема, на початковій ділянці волокна PON-1 і PON-2 проходять спільною трасою до бокса 2.1. Далі волокно PON-1 проходить транзитом по першому волокну 8-волоконного кабелю на ділянці 2.1–2.2 і в боксі 2.2 відводиться до бокса 1.1. Це дозволяє використати один кабель на спільній ділянці та уникнути прокладання двох паралельних кабелів між боксами 2.1 і 2.2.

Прокладання оптичних кабелів передбачається виконувати повітряним способом із використанням існуючих залізобетонних опор повітряних ліній електропередач напругою 0,4 кВ. Такий спосіб є доцільним для приватного сектору, оскільки дозволяє зменшити обсяг земляних робіт, скоротити терміни будівництва мережі та забезпечити зручний доступ до кабельної інфраструктури під час експлуатації та аварійно-відновлювальних робіт.

Магістральний оптичний кабель прокладається від станційного вузла оператора або точки введення мережі до межі проєктної зони. У точці входу в абонентський кластер передбачається встановлення оптичної муфти, у якій виконується розподіл робочих волокон за окремими PON-гілками. Кожна PON-гілка підключається до окремого PON-порту OLT та прокладається вздовж відповідного напрямку трасування.

Розміщення розподільчих PON-боксів визначається положенням будинків уздовж вулиць, наявністю опор та необхідністю обмежити довжину абонентських дроп-кабелів. Тому PON-бокси встановлюються не через однакові проміжки, а в місцях, де зручно організувати підключення локальних груп абонентів.

За результатами трасування для трьох PON-гілок передбачається встановлення 24 розподільчих PON-боксів. На кожній PON-гілці розміщується по 8 PON-боксів. Такий розподіл прийнято відповідно до логіки побудови розподільчої частини мережі, за якої після PLC-сплітера 1:8 кожне з восьми волокон підводиться до окремого PON-бокса.

Відповідно до уточненої схеми трасування, розподіл абонентів між PON-боксами приймається таким: для PON-1 бокси 1.1–1.8 обслуговують відповідно 2, 4, 3, 4, 2, 4, 4 та 1 будинок; для PON-2 бокси 2.1–2.8 обслуговують 2, 2, 4, 3, 4, 3, 3 та 3 будинки; для PON-3 бокси 3.1–3.8 обслуговують 3, 3, 3, 4, 3, 3, 3 та 2 будинки. У кожній PON-гілці загальна кількість абонентських підключень становить 24.

На третій PON-гілці окремий будинок, розташований на початку вулиці, не виділяється в окремий дев’ятий PON-бокс. Його підключення виконується дроп-кабелем від найближчого наступного PON-бокса, який обслуговує ще два будинки. Таким чином, перший PON-бокс третьої гілки має три абонентські підключення, а один із виходів PLC-сплітера 1:4 залишається резервним.

Кількість будинків, підключених до одного PON-бокса, не є однаковою і становить від 1 до 4 абонентських підключень. Такий розподіл пояснюється особливостями розташування будинків уздовж вулиць, положенням опор та необхідністю мінімізувати довжину абонентських дроп-кабелів. Детальне розміщення PON-боксів і напрямки підключення абонентів показані на схемі трасування.

Абонентські підключення від PON-боксів до будинків виконуються зовнішнім оптичним дроп-кабелем. Дроп-кабель прокладається повітряним способом від опори з розподільчим PON-боксом до фасадного кріплення будинку,

після чого вводиться всередину приміщення до місця встановлення абонентського термінала ONU/ONT. При виборі напрямку відгалуження враховується мінімізація довжини кабелю, зручність монтажу, захист від механічних пошкоджень та можливість безпечного перетину проїзної частини.

У місцях встановлення розподільчих PON-боксів передбачається залишення технологічного запасу оптичного кабелю. Такий запас необхідний для виконання монтажних робіт, зварювання волокон, підключення нових абонентів, а також проведення ремонтних робіт без заміни значної ділянки кабельної лінії. Кабельний запас розміщується у вигляді бухти та фіксується на спеціальних кронштейнах або елементах кріплення на опорі.

Під час прокладання повітряних оптичних ліній необхідно дотримуватися вимог щодо безпечної висоти підвісу кабелю. На звичайних ділянках траси висота підвісу повинна забезпечувати захист кабелю від випадкового механічного пошкодження. У місцях перетину з автомобільними проїздами та внутрішніми дорогами селища висота підвісу збільшується для забезпечення безпечного проїзду транспорту. Кріплення самонесучого кабелю на опорах виконується за допомогою натяжної та підтримуючої арматури, бандажної стрічки, кронштейнів і анкерних елементів.

Для зручності експлуатації та подальшого обслуговування всі PON-бокси розміщуються у доступних для монтажних бригад місцях уздовж траси. При цьому враховується необхідність захисту обладнання від несанкціонованого доступу та зовнішніх атмосферних впливів. Корпуси розподільчих PON-боксів повинні мати вуличне виконання та клас захисту не нижче IP65.

На схемі трасування не відображається станційне обладнання OLT, оскільки воно розміщується на вузлі зв’язку провайдера за межами розглянутої проєктної зони. У програмному середовищі трасування показується лінійно-кабельна частина мережі в межах абонентського кластера. Точка входу магістрального кабелю в проєктну зону позначена трикутником, а зіркою позначена муфта провайдера М1, від якої виконується подальший розподіл робочих волокон між трьома PON-гілками. На схемі червоними кругами

позначено проміжні опори, на яких не встановлюються розподільчі PON-бокси, але через які проходить траса прокладання оптичного кабелю. Схема трасування оптичних ліній від точки входу магістрального кабелю до розподільчих PON-боксів наведена на рисунку 2.9.

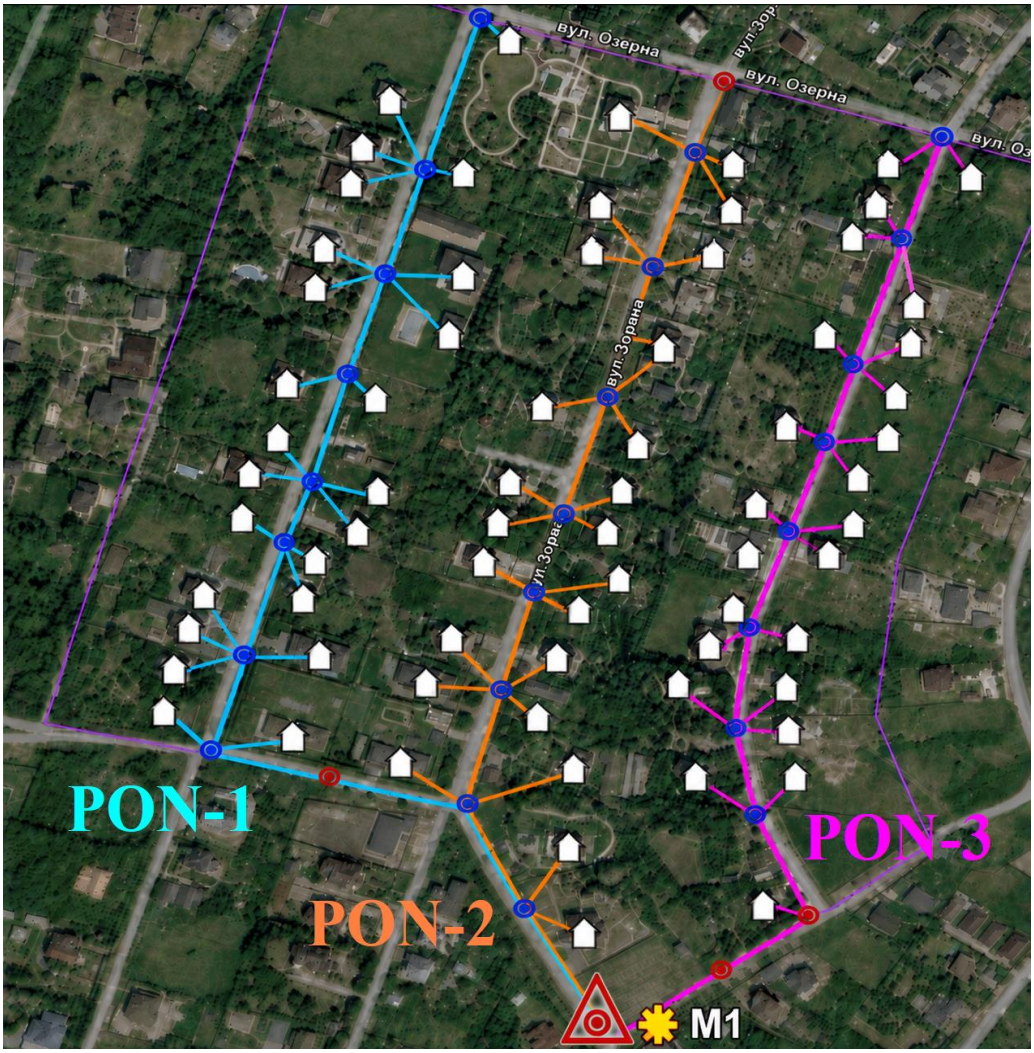


Рисунок 2.9 – Схема трасування оптичних ліній та розміщення PON-боксів у проєктній зоні

Таким чином, розроблена схема трасування забезпечує підключення абонентських будинків у межах обраної проєктної зони з урахуванням розташування вулиць, будинків та наявної опорної інфраструктури. Розміщення PON-боксів поблизу локальних груп абонентів дозволяє зменшити довжину дроп-кабелів і спростити подальше технічне обслуговування мережі.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було виконано проєктування структури пасивної оптичної мережі доступу GEPON для окремого абонентського кластера котеджного селища «Родичі». Було визначено планувальні особливості обраної проєктної зони, склад абонентського обладнання та основні вимоги до побудови мережі доступу.

На основі прийнятої моделі абонентського навантаження виконано розрахунок очікуваного пікового трафіку. З урахуванням експлуатаційного запасу розрахункове навантаження становить приблизно 2,63 Гбіт/с. Для його розподілу прийнято використання трьох окремих PON-гілок, що дозволяє зменшити навантаження на один PON-порт і забезпечити стабільнішу роботу мережі у піковий період.

Для реалізації проєктованої мережі обґрунтовано вибір основного активного та пасивного обладнання: OLT, ONU/ONT, ODF, PLC-сплітерів, оптичних муфт, PON-боксів, магістральних і дроп-кабелів, а також монтажної арматури для повітряного прокладання ліній.

Також було виконано трасування оптичної мережі з урахуванням розташування будинків, вулиць та наявної опорної інфраструктури. За результатами трасування передбачено встановлення 24 розподільчих PON-боксів, розміщених поблизу локальних груп абонентів. Таке рішення дозволяє скоротити довжину абонентських дроп-кабелів і спростити подальше технічне обслуговування мережі.

Для оптимізації фізичного прокладання кабелю на початковій ділянці траси передбачено спільне прокладання волокон PON-1 і PON-2 до бокса 2.1 у складі двоволоконного кабелю. Після цього волокно PON-1 проходить транзитом через ділянку 2.1–2.2 по першому волокну 8-волоконного розподільчого кабелю і в боксі 2.2 відводиться до бокса 1.1.

Отримані результати є основою для подальшої перевірки працездатності мережі, зокрема моделювання затухання оптичного сигналу, розрахунку оптичного бюджету та оцінки пропускної здатності PON-гілок у наступному розділі.

3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ МЕРЕЖІ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЇЇ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

3.1 Розробка волоконно-оптичної моделі мережі

Після визначення структури мережі, кількості PON-гілок, вибору обладнання та трасування кабельних ліній необхідно сформувати волоконно-оптичну модель проєктованої мережі. Така модель показує не лише загальне з’єднання обладнання, а й принцип розподілу оптичних волокон між PON-гілками, розподільчими боксами та абонентськими підключеннями.

На відміну від структурної схеми, волоконна схема деталізує проходження волокон у кабелі та показує, яке саме волокно використовується для підключення окремої групи абонентів. Це дозволяє впорядкувати підключення, спростити подальше обслуговування мережі та зменшити ймовірність помилок під час монтажу або аварійно-відновлювальних робіт.

У проєктованій мережі станційний термінал OLT підключається до оптичного розподільчого кросу ODF. Від ODF у напрямку проєктної зони прокладається магістральний одномодовий оптичний кабель із запасом волокон. У межах розробленої моделі використовуються три робочі волокна: перше — для PON-1, друге — для PON-2, третє — для PON-3. Інші волокна магістрального кабелю не входять до розрахункової частини даного проєкту та можуть використовуватися як резерв або для подальшого розширення мережі на інші ділянки селища.

У проєктованій мережі кожен PON-порт OLT відповідає окремій PON-гілці. Тобто перший PON-порт формує гілку PON-1, другий PON-порт — гілку PON-2, а третій PON-порт — гілку PON-3. Такий поділ дозволяє розділити абонентське навантаження між трьома незалежними напрямками доступу та спростити подальше обслуговування мережі.

Розподіл робочих волокон у межах проєктованої зони приймається таким:

– перше робоче волокно — PON-1;

– друге робоче волокно — PON-2;

– третє робоче волокно — PON-3;

– інші волокна магістрального кабелю — резервні або перспективні.

У точці входу магістрального кабелю в проєктну зону передбачається встановлення оптичної муфти М1. У цій муфті виконується розподіл робочих волокон за трьома PON-гілками. Логічно кожна PON-гілка залишається окремим напрямком від відповідного PON-порту OLT і обслуговує 24 абонентські підключення. Водночас фізичне прокладання волокон виконується з урахуванням фактичної траси кабелю. Волокно PON-1 проходить спільною початковою ділянкою з PON-2 до бокса 2.1, далі транзитом по першому волокну кабелю 2.1–2.2, після чого в боксі 2.2 відводиться до бокса 1.1.

Для кожної PON-гілки використовується однаковий принцип побудови волоконної моделі. Робоче волокно від відповідного PON-порту OLT через ODF і магістральну ділянку подається до першого каскаду пасивного розгалуження PLC 1:8. Після цього формуються вісім розподільчих напрямків, кожен з яких підводиться до окремого PON-бокса. У відповідному PON-боксі це волокно підключається до PLC-сплітера 1:4, від якого виконуються абонентські дроп-підключення до будинків.

Для третьої PON-гілки приймається уточнена схема підключення: окремий будинок на початку вулиці підключається дроп-кабелем від найближчого наступного PON-бокса. Завдяки цьому для всіх PON-гілок зберігається єдиний принцип побудови: PLC 1:8 формує вісім напрямків до PON-боксів, а PLC 1:4 у кожному боксі забезпечує підключення абонентів.

Принцип розподілу волокон у межах однієї PON-гілки є таким:

– волокно 1 розподільчого кабелю підключається до першого PON-бокса;

– волокно 2 — до другого PON-бокса;

– волокно 3 — до третього PON-бокса;

– волокно 4 — до четвертого PON-бокса;

– волокно 5 — до п’ятого PON-бокса;

– волокно 6 — до шостого PON-бокса;

– волокно 7 — до сьомого PON-бокса;

– волокно 8 — до восьмого PON-бокса.

У кожному PON-боксі відповідне волокно підключається до PLC-сплітера 1:4. Виходи сплітера 1:4 використовуються для підключення абонентських дроп-кабелів до будинків. Якщо до бокса підключається менше чотирьох будинків, незадіяні виходи сплітера залишаються резервними. Це забезпечує можливість подальшого підключення додаткових абонентів без зміни структури розподільчої частини мережі.

На рисунку 3.1 наведено волоконну схему розподілу оптичних волокон у проєктованій мережі GEPON. На схемі показано станційний вузол OLT, оптичний крос ODF, муфту M1, три PON-гілки, сплітери 1:8, 8-волоконні розподільчі кабелі, PON-бокси зі сплітерами 1:4 та абонентські підключення.

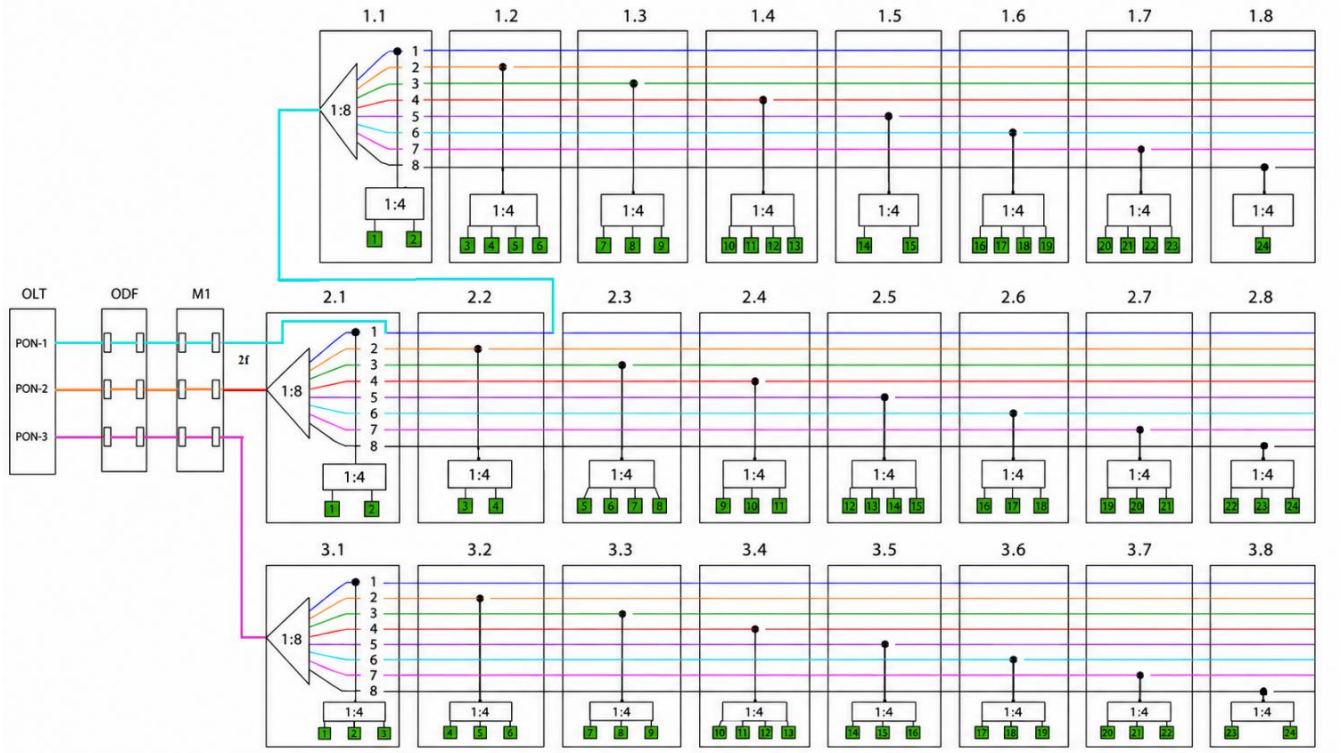


Рисунок 3.1 – Волоконно-оптична модель у проєктованій мережі GEPON

Для кожної PON-гілки у волоконній моделі передбачається використання восьми PON-боксів. Це відповідає кількості виходів PLC-сплітера 1:8 і дозволяє

уніфікувати побудову розподільчої частини мережі для всіх трьох вулиць. Абонентські підключення виконуються через PLC-сплітери 1:4, розміщені у відповідних PON-боксах.

Запропонована волоконна модель дозволяє чітко визначити, яке волокно використовується для живлення кожного PON-бокса, а також показує зв’язок між першим каскадом розгалуження 1:8 і другим каскадом 1:4. Така схема є зручною для практичного використання, оскільки дає змогу швидко ідентифікувати потрібне волокно під час підключення абонента, пошуку пошкодження або виконання ремонтних робіт.

Таким чином, у межах підрозділу сформовано волоконно-оптичну модель мережі GEPON, яка відображає розподіл робочих і резервних волокон, принцип підключення PON-боксів та організацію абонентських відгалужень. Отримана модель використовується як основа для подальшого моделювання затухання оптичного сигналу та розрахунку оптичного бюджету PON-гілок.

3.2 Аналітичне моделювання оптичного бюджету

Після розробки волоконно-оптичної моделі мережі необхідно виконати перевірку проходження оптичного сигналу від станційного обладнання OLT до абонентських терміналів ONU/ONT. Така перевірка є одним із основних етапів оцінки працездатності пасивної оптичної мережі, оскільки дозволяє визначити, чи не перевищує сумарне затухання допустимий оптичний бюджет обладнання.

У технології GEPON передавання сигналу здійснюється через пасивну оптичну розподільчу мережу, яка не містить активного обладнання між OLT та ONU/ONT. Тому рівень оптичного сигналу на вході абонентського термінала залежить від втрат у кабельних ділянках, пасивних сплітерах, зварних з’єднаннях, конекторах та від прийнятого експлуатаційного запасу.

Загальне затухання оптичного сигналу для однієї PON-гілки визначається за формулою:

$$А_{заг} = А_{каб} + А_{спл} + А_{кон} + А_{зв} + А_{зап},$$

де Азаг — сумарне затухання оптичної лінії, дБ;

Акаб — втрати в оптичному кабелі, дБ;

Аспл — втрати на пасивних PLC-сплітерах, дБ;

Акон — втрати на конекторних з’єднаннях, дБ;

Азв — втрати на зварних з’єднаннях, дБ;

Азап — експлуатаційний запас, дБ.

Втрати в оптичному кабелі залежать від довжини траси та питомого коефіцієнта загасання волокна:

$$Акаб = \alpha \cdot L,$$

де α — коефіцієнт загасання одномодового оптичного волокна, дБ/км; L — довжина оптичної траси до розрахункового абонента, км.

Для розрахунку приймається коефіцієнт загасання одномодового волокна $\alpha = 0{,}35$ дБ/км. Оскільки в проєктованій мережі використовується каскадна схема пасивного розгалуження 1:8 та 1:4, сумарні втрати на сплітерах становлять:

$$Аспл = А1{:}8 + А1{:}4 = 10{,}5 + 7{,}2 = 17{,}7 \text{ дБ}.$$

Для врахування втрат на з’єднаннях приймаються такі значення: втрати на одному конекторному з’єднанні — 0,5 дБ, втрати на одному зварному з’єднанні — 0,1 дБ. У розрахунковій моделі враховується два конекторні з’єднання та чотири зварні з’єднання:

$$Акон = 2 \cdot 0{,}5 = 1{,}0 \text{ дБ};$$

$$Азв = 4 \cdot 0{,}1 = 0{,}4 \text{ дБ}.$$

Для забезпечення стабільної роботи мережі також враховується експлуатаційний запас Азап = 3 дБ. Він необхідний для компенсації можливого старіння кабелю, забруднення конекторів, додаткових втрат під час експлуатації та незначних змін у схемі підключення.

Основні вихідні дані для моделювання затухання наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Вихідні дані для розрахунку затухання оптичного сигналу

Параметр	**Позначення**	**Прийняте значення**
Коефіцієнт загасання оптичного волокна	α	0,35 дБ/км
Втрати PLC-сплітера 1:8	A1:8	10,5 дБ
Втрати PLC-сплітера 1:4	A1:4	7,2 дБ
Кількість конекторних з’єднань	nкон	2
Втрати на одному конекторному з’єднанні	Акон1	0,5 дБ
Кількість зварних з’єднань	nзв	4
Втрати на одному зварному з’єднанні	Азв1	0,1 дБ
Експлуатаційний запас	Азап	3 дБ
Допустимий оптичний бюджет GEPON PON-модуля класу PX20	Вдоп	24 дБ

У подальшому розрахунку значення Вдоп = 24 дБ приймається як допустимий оптичний бюджет GEPON PON-модуля класу PX20 [8]. Це значення використовується для перевірки працездатності оптичної розподільчої мережі між PON-портом OLT та абонентським терміналом ONU/ONT.

З урахуванням прийнятих параметрів сумарне затухання для стандартної ділянки PON-2 та PON-3 можна визначити за спрощеною формулою:

$$Азаг = 0,35 \cdot L + 17,7 + 1,0 + 0,4 + 3.$$

Отже:

$$Азаг = 0,35 \cdot L + 22,1.$$

Для перевірки працездатності мережі розрахунок виконується для найдальшого абонента кожної PON-гілки. Саме найдальший абонент має найбільшу довжину кабельної траси, тому для нього сумарне затухання буде максимальним.

Для гілок PON-2 та PON-3 у розрахунку приймається чотири зварні з’єднання, що відповідає втратам 0,4 дБ. Для гілки PON-1 додатково враховується транзитне проходження волокна через бокс 2.1 та відведення в боксі 2.2, тому втрати на зварних з’єднаннях приймаються рівними 0,6 дБ.

Результати розрахунку затухання для PON-гілок наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Розрахунок сумарного затухання оптичного сигналу в PON-гілках

PON-гілка	**Довжина траси до найдальшого абонента L, км**	**Втрати в кабелі Акаб, дБ**	**Втрати на сплітерах Аспл, дБ**	**Втрати на конекторах Акон, дБ**	**Втрати на зварках Азв, дБ**	**Запас Азап, дБ**	**Сумарне затухання Азаг, дБ**
PON-1	0,7	0,35 · 0,7 = 0,25	17,7	1,0	0,6	3,0	22,55
PON-2	0,7	0,35 · 0,7 = 0,25	17,7	1,0	0,4	3,0	22,35
PON-3	0,7	0,35 · 0,7 = 0,25	17,7	1,0	0,4	3,0	22,35

Для PON-2 і PON-3 сумарне затухання становить 22,35 дБ. Для PON-1 додатково враховується транзитне проходження волокна через бокс 2.1 та відведення в боксі 2.2 у напрямку бокса 1.1. У цьому випадку втрати на зварних з’єднаннях для PON-1 збільшуються до 0,6 дБ, а сумарне затухання становить 22,55 дБ. Отримане значення також не перевищує допустимий оптичний бюджет 24 дБ, тому PON-1 залишається працездатною.

За результатами трасування у програмному середовищі було визначено довжини кабельних трас до найдальших абонентів PON-гілок. Для контрольного розрахунку оптичного бюджету прийнято максимальну довжину траси до найдальшого абонента L = 0,7 км для кожної PON-гілки. Це значення враховує протяжність магістральної та розподільчої ділянок, довжину абонентських відгалужень, проходження кабелю по опорах, а також технологічний запас на особливості повітряного прокладання кабелю.

З урахуванням результатів таблиці 3.2 максимальне сумарне затухання спостерігається для гілки PON-1 і становить 22,55 дБ. Для гілок PON-2 та PON-3 сумарне затухання становить 22,35 дБ. Перевірка працездатності оптичної лінії виконується за умовою:

$$Азаг \leq Вдоп,$$

де Вдоп — допустимий оптичний бюджет обладнання GEPON.
Усі отримані значення не перевищують допустимий оптичний бюджет GEPON 24 дБ:

$$22{,}55 \text{ дБ} < 24 \text{ дБ}.$$

Отже, для визначеної під час трасування максимальної довжини кабельної траси рівень оптичного сигналу залишається в допустимих межах. Це підтверджує працездатність проєктованої мережі за критерієм оптичного бюджету.

3.3 Моделювання пропускної здатності мережі PON

Після перевірки оптичного бюджету необхідно оцінити працездатність проєктованої мережі за пропускною здатністю. Така перевірка дозволяє визначити, чи здатні PON-гілки забезпечити передавання розрахованого пікового трафіку без перевантаження PON-портів OLT.

У підрозділі 2.2 було визначено розрахункове пікове навантаження мережі з урахуванням експлуатаційного запасу. Його значення становить:

$$Р_{розр} = 2{,}63 \text{ Гбіт/с}.$$

Для розподілу навантаження в проєктованій мережі прийнято використання трьох окремих PON-гілок. Тоді середнє розрахункове навантаження на одну PON-гілку становить:

$$Р_{гілки} = Р_{розр} / 3 = 2{,}63 / 3 = 0{,}88 \text{ Гбіт/с}.$$

Номінальна лінійна швидкість одного PON-порту OLT стандарту GEPON приймається рівною 1,25 Гбіт/с. У даному розрахунку використовується паспортна номінальна швидкість PON-порту GEPON. Розрахунок має характер інженерної оцінки завантаження порту та не враховує окремо службові й

протокольні накладні витрати, пов’язані з лінійним кодуванням, службовими кадрами та механізмами керування доступом до середовища. Для урахування можливих коливань трафіку та експлуатаційних відхилень у моделі навантаження передбачено запас 10%.

Для оцінки завантаження PON-гілки використовується коефіцієнт завантаження:

$$Кзав = Ргілки / Рпорт \cdot 100\%,$$

де Кзав — коефіцієнт завантаження PON-порту, %;
Ргілки — розрахункове навантаження на одну PON-гілку, Гбіт/с;
Рпорт — номінальна лінійна швидкість PON-порту OLT стандарту GEPON, Гбіт/с.
Для прийнятої структури мережі:

$$Кзав = 0,88 / 1,25 \cdot 100\% = 70,4\%.$$

Отримане значення показує, що в розрахунковому піковому режимі PON-порт не перевантажується. При цьому залишається запас пропускної здатності:

$$Рзап = 1,25 – 0,88 = 0,37 Гбіт/с.$$

Для додаткової оцінки роботи мережі виконується моделювання завантаження PON-гілок за різних рівнів трафіку. За основу приймається розрахункове пікове навантаження Ррозр = 2,63 Гбіт/с, а навантаження на одну PON-гілку визначається як третина сумарного трафіку.
Результати моделювання наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Моделювання завантаження PON-гілок за різних рівнів трафіку

Рівень навантаження від розрахункового піку, %	**Загальне навантаження мережі, Гбіт/с**	**Навантаження на одну PON-гілку, Гбіт/с**	**Коефіцієнт завантаження PON-порту, %**	**Оцінка режиму роботи**
50	1,32	0,44	35,2	Нормальний режим
70	1,84	0,61	48,8	Нормальний режим
100	2,63	0,88	70,4	Піковий розрахунковий режим
120	3,16	1,05	84,0	Допустимий режим із підвищеним навантаженням
140	3,68	1,23	98,4	Граничний режим роботи

На основі даних таблиці 3.3 побудовано графік залежності коефіцієнта завантаження PON-порту від рівня трафіку в мережі.

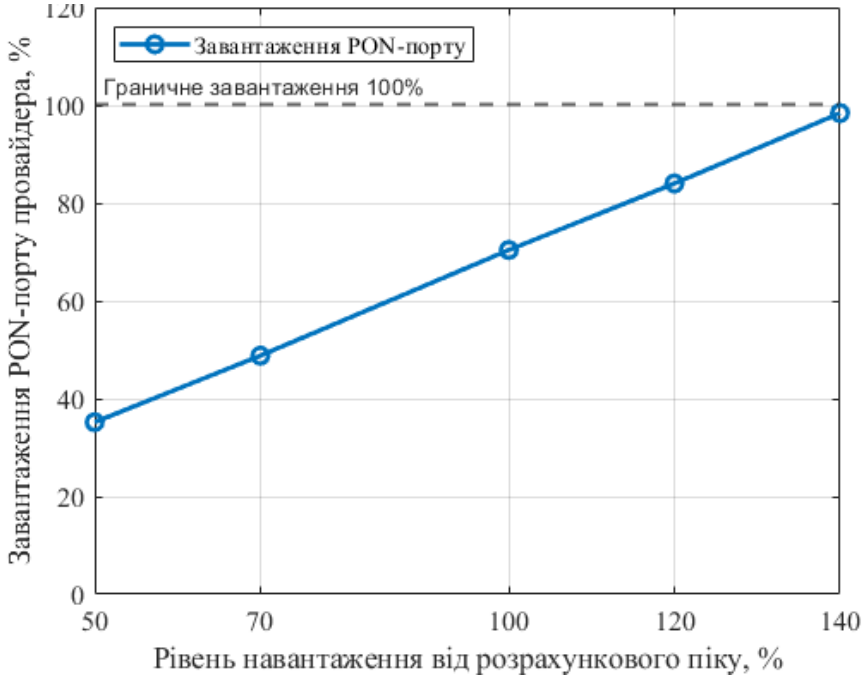


Рисунок 3.2 – Моделювання завантаження PON-порту OLT стандарту GEPON за різних рівнів трафіку

З рисунка 3.2 видно, що при розрахунковому піковому навантаженні, яке відповідає 100%, завантаження PON-порту становить 70,4%. Це свідчить про наявність запасу пропускної здатності. При збільшенні навантаження до 120% порт використовується на 84%, що також залишається допустимим режимом роботи. При навантаженні 140% коефіцієнт завантаження досягає 98,4%, тобто PON-порт наближається до граничного режиму.

Окремо можна розглянути ситуацію масового одночасного завантаження великих файлів, наприклад ігор, оновлень програмного забезпечення або мультимедійного контенту. У такому режимі значна кількість абонентів однієї PON-гілки може одночасно створювати високий низхідний трафік. Оскільки пропускна здатність PON-гілки є спільним ресурсом для всіх абонентів, при збільшенні кількості одночасно активних користувачів середня доступна швидкість для одного абонента зменшується. Для спрощеної оцінки можна використати вираз:

$$Vср = Рпорт / Nакт,$$

де Vср — середня доступна швидкість для одного активного абонента, Мбіт/с;

Рпорт — номінальна пропускна здатність PON-порту OLT стандарту GEPON, Мбіт/с;

Nакт — кількість одночасно активних абонентів у межах однієї PON-гілки.

У розрахунку приймається номінальна швидкість PON-порту 1,25 Гбіт/с, або 1250 Мбіт/с. При цьому для одного активного абонента враховується обмеження тарифної швидкості на рівні 1000 Мбіт/с, тому значення 1250 Мбіт/с у таблиці не використовується. Результати оцінки наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 — Оцінка середньої доступної швидкості при масовому завантаженні

Кількість одночасно активних абонентів	Середня доступна швидкість на одного абонента, Мбіт/с
1	1000
2	625
4	313
8	156
12	104
16	78
20	63
24	52

На основі даних таблиці 3.4 побудовано графік залежності середньої доступної швидкості від кількості одночасно активних абонентів у межах однієї PON-гілки.

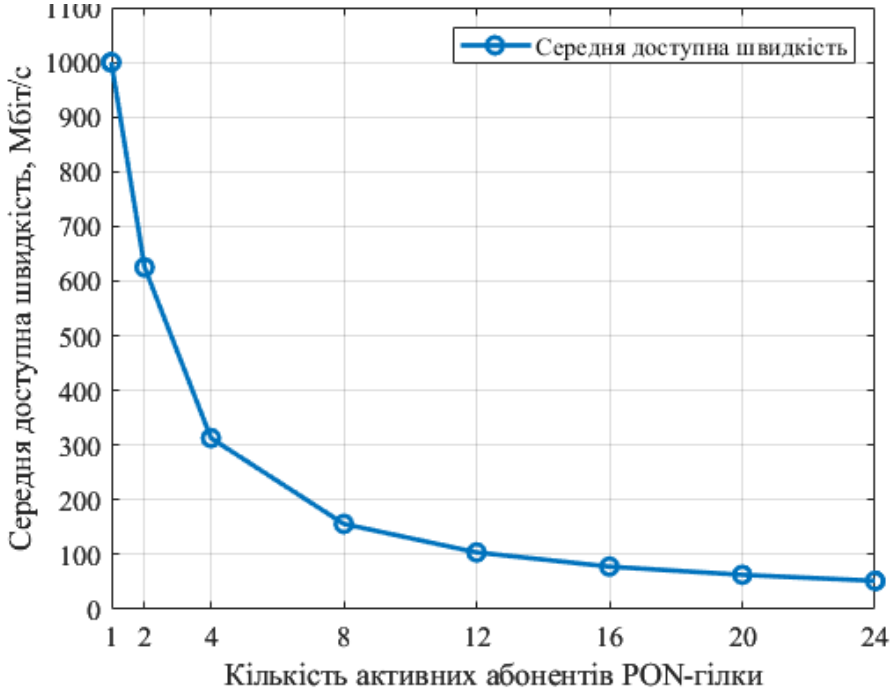


Рисунок 3.3 – Зміна середньої доступної швидкості залежно від кількості активних абонентів PON-гілки

З рисунка 3.3 видно, що при невеликій кількості активних абонентів середня доступна швидкість залишається високою. Однак при збільшенні кількості одночасно активних користувачів спільний ресурс PON-гілки

розподіляється між більшою кількістю абонентів, тому фактична швидкість для одного користувача зменшується. Наприклад, при одночасній активності 24 абонентів середня доступна швидкість становить приблизно 52 Мбіт/с.

Таким чином, у разі масового одночасного завантаження великих файлів мережа не втрачає працездатність, однак може спостерігатися зменшення фактичної швидкості доступу для окремих абонентів. При наближенні сумарного трафіку до граничної пропускної здатності PON-порту також можливе збільшення затримок, утворення черг пакетів і короткочасне погіршення якості доступу. Для зменшення такого впливу в реальних мережах застосовують розподіл абонентів між кількома PON-гілками, обмеження тарифної швидкості, механізми QoS та резерв пропускної здатності.

За результатами моделювання можна зробити висновок, що проєктована мережа має достатню пропускну здатність для обслуговування абонентів у межах прийнятої моделі пікового навантаження. Використання трьох PON-гілок дозволяє рівномірно розподілити трафік між PON-портами OLT, зменшити навантаження на кожну окрему гілку та забезпечити стабільну роботу мережі. Водночас у режимі масового одночасного завантаження великих файлів фактична швидкість для окремого абонента може зменшуватися, оскільки ресурс PON-гілки є спільним для всіх підключених користувачів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було розроблено волоконно-оптичну модель проєктованої мережі GEPON та виконано перевірку її основних технічних параметрів. Сформована модель відображає принцип розподілу робочих волокон між PON-гілками, підключення розподільчих PON-боксів та організацію абонентських відгалужень до приватних будинків.

У межах моделі прийнято каскадну схему пасивного розгалуження з використанням PLC-сплітерів 1:8 та 1:4. Такий підхід дозволяє впорядкувати структуру розподільчої частини мережі, забезпечити зручність підключення

абонентів і залишити можливість подальшого розширення мережі без суттєвої зміни її архітектури.

У розділі було виконано моделювання затухання оптичного сигналу в PON-гілках. Розрахунок показав, що максимальне сумарне затухання спостерігається для гілки PON-1 і становить 22,55 дБ, що не перевищує прийнятий допустимий оптичний бюджет 24 дБ. Отже, проєктована мережа є працездатною за критерієм оптичного бюджету.

Також було проведено оцінку пропускної здатності PON-гілок за різних рівнів навантаження. При розрахунковому піковому навантаженні завантаження одного PON-порту становить близько 70,4%, що свідчить про наявність експлуатаційного запасу пропускної здатності. Результати моделювання підтвердили, що прийнятий поділ мережі на три окремі PON-гілки дозволяє рівномірно розподілити абонентський трафік між портами OLT та забезпечити стабільну роботу мережі в умовах пікового користувацького навантаження.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано розробку лінійно-кабельної інфраструктури пасивної оптичної мережі доступу GEPON для котеджного селища. У процесі роботи було розглянуто принципи побудови пасивних оптичних мереж, особливості технології GEPON, топології мереж доступу та склад основного активного і пасивного обладнання.

На основі аналізу обраної проєктної зони було визначено вихідні дані для побудови мережі, виконано оцінку очікуваного інформаційного навантаження та обґрунтовано поділ мережі на окремі PON-гілки. Такий підхід дозволяє рівномірно розподілити абонентський трафік між портами OLT і забезпечити стабільнішу роботу мережі в умовах пікового навантаження.

У роботі було обрано основне мережеве обладнання, розроблено схему трасування оптичних ліній, визначено розміщення розподільчих PON-боксів та сформовано волоконно-оптичну модель мережі. Запропонована структура враховує особливості приватної забудови, наявну опорну інфраструктуру та необхідність зменшення довжини абонентських дроп-кабелів.

Перевірка працездатності показала, що проєктована мережа відповідає вимогам за оптичним бюджетом і пропускною здатністю. Отримані результати підтверджують доцільність використання технології GEPON для побудови FTTH-мережі в умовах приватного котеджного селища. Запропоноване рішення може бути використане як основа для подальшого практичного проєктування та розгортання мережі абонентського доступу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Розорінов Г. М., Соловйов Д. О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку : навч. посіб. 2-ге вид., перероб. і допов. Київ : Кафедра, 2012. 344 с.

2. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський та ін. ; за заг. ред. В. В. Поповського. Харків : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с.

3. IEEE 802.3ah-2004. IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks. — IEEE, 2004.

4. ITU-T Recommendation G.984.1. Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics. — International Telecommunication Union, 2008.

5. NetCalc – інтерактивний пакет для проектування оптичної мережі FTTH // Teralink. — URL: https://www.teralink.ru/ru/proektirovanie (дата звернення: 19.05.2026).

6. Конфігуратор мереж PON в приватному секторі // ВОЛС Експерт. — URL: https://vols.expert/ftth/ (дата звернення: 19.05.2026).

7. Розрахунок швидкості передачі даних в мережі PON // IC-Line. — URL: https://ic-line.ua/wiki/raschjot-skorosti-peredachi-dannykh-v-seti-pon (дата звернення: 19.05.2026).

8. EPON/GEPON OLT PX20 SFP Transceiver Datasheet. Fiber Mall Co., Limited. — URL: https://www.fibermall.com/file/datasheet/epon-olt-px20.pdf (дата звернення: 19.05.2026).