ВСТУП

Стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій упродовж останніх десятиліть суттєво змінив підходи до організації мереж доступу та принципи надання інформаційно-комунікаційних послуг. Зростання кількості користувачів мережі Інтернет, поява ресурсоємних сервісів, таких як хмарні обчислення, потокове відео високої роздільної здатності, дистанційне навчання та телемедицина, зумовили необхідність переходу до нових технологічних рішень, здатних забезпечити високу пропускну здатність, надійність та масштабованість мереж зв’язку.

Особливе значення у цьому процесі має розвиток мереж доступу, які є кінцевою ланкою телекомунікаційної інфраструктури та безпосередньо визначають якість послуг для кінцевих абонентів. У сучасних умовах традиційні технології доступу, що базуються на мідних лініях або бездротових каналах, дедалі частіше не відповідають зростаючим вимогам щодо швидкості передавання даних, стабільності з’єднання та довгострокової експлуатаційної ефективності.

У зв’язку з цим волоконно-оптичні технології доступу набули статусу базового рішення для побудови сучасних телекомунікаційних мереж. Концепція FTTx, реалізована на основі пасивних оптичних мереж, дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси оптичного волокна, зменшувати кількість активних елементів у мережі та забезпечувати високі показники надійності й енергетичної ефективності. Подальший розвиток стандартів PON спрямований на збільшення пропускної здатності та розширення можливостей масштабування мереж доступу.

У цьому контексті технологія XG-PON розглядається як перспективне рішення для модернізації та побудови нових мереж доступу, зокрема в умовах сільської місцевості, де специфічні географічні та економічні фактори суттєво впливають на вибір архітектури мережі та технічних параметрів обладнання.

Впровадження технології XG-PON забезпечує можливість поетапного оновлення існуючих мереж доступу без необхідності повної заміни оптичної

інфраструктури, що є важливим фактором з точки зору економічної доцільності. Використання спільного оптичного середовища передачі даних дозволяє оператору зв'язку ефективно обслуговувати значну кількість абонентів, гарантуючи при цьому необхідний рівень якості сервісу для таких послуг, як високошвидкісний доступ до Інтернету, VoIP та IPTV. Завдяки підвищеній пропускній здатності у низхідному та висхідному напрямках, а також удосконаленим механізмам керування трафіком, XG-PON створює передумови для подальшого розвитку конвергентних інформаційно-комунікаційних сервісів та відповідає сучасним вимогам до побудови мереж доступу нового покоління.

Актуальність роботи: Сучасний етап розвитку інформаційного суспільства характеризується стрімким зростанням обсягів передаваних даних, розширенням спектра цифрових сервісів та підвищенням вимог до якості й надійності телекомунікаційних послуг. Особливо гостро ці тенденції проявляються в контексті забезпечення широкосмугового доступу до мережі Інтернет, який сьогодні є необхідною умовою соціально-економічного розвитку територій, цифровізації освіти, медицини, державних послуг та бізнесу.

Водночас у сільській місцевості проблема організації високошвидкісного доступу залишається однією з найбільш актуальних. Низька щільність абонентів, значні відстані між населеними пунктами, обмежена наявність існуючої телекомунікаційної інфраструктури та високі капітальні витрати ускладнюють впровадження сучасних технологій доступу. Традиційні рішення на основі мідних ліній або бездротових технологій часто не здатні забезпечити необхідну пропускну здатність, стабільність та масштабованість мережі в довгостроковій перспективі.

У цьому контексті особливу увагу привертають волоконно-оптичні технології доступу за концепцією FTTx, зокрема пасивні оптичні мережі (PON), які дозволяють ефективно використовувати оптичне волокно та мінімізувати кількість активного обладнання на лінії. Технологія XG-PON, як еволюційний розвиток GPON, забезпечує істотно вищу пропускну здатність і більший оптичний бюджет, що створює передумови для її застосування в умовах значних відстаней та високих коефіцієнтів розгалуження, характерних для сільської місцевості. Водночас

питання практичної доцільності впровадження XG-PON, вибору топології мережі, параметрів оптичної розподільної мережі та оцінки працездатності для конкретних умов потребують детального аналізу та дослідження, що і визначає актуальність даної магістерської роботи.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження мережі доступу на основі технології XG-PON для сільської місцевості, з урахуванням технічних, експлуатаційних та економічних особливостей розгортання волоконно-оптичних мереж у умовах низької щільності абонентів, а також обґрунтування доцільності використання технології XG-PON порівняно з GPON.

Об’єктом дослідження є мережі широкосмугового доступу на основі пасивних оптичних технологій PON, що використовуються для надання телекомунікаційних послуг у сільській місцевості.

Предметом дослідження є процеси проєктування, моделювання та оцінки параметрів роботи мережі доступу на основі технології XG-PON, зокрема розрахунок оптичного бюджету, аналіз втрат потужності сигналу, вибір топології мережі та дослідження впливу довжини ліній і кількості абонентів на працездатність і якість обслуговування.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСТУПУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Загальна характеристика технологій доступу до мережі Інтернет

Мережі доступу до Інтернету - Access Networks є ключовим елементом телекомунікаційної інфраструктури будь-якої країни. Вони відповідають за підключення кінцевих абонентів до магістральних мереж провайдерів, забезпечують надання широкосмугових послуг та визначають якість користувацького досвіду. У сучасних умовах цифровізації та активного розвитку сервісів, таких як відеоконференції, онлайн-освіта, хмарні сервіси та інтернет речей IoT, швидкість та надійність підключення стають критично важливими.

Мережі доступу класифікуються за типом середовища передачі сигналу: дротові такі як мідна лінія, коаксіальний кабель, оптоволокно та безпроводові а саме - мобільні мережі, Wi-Fi, WiMAX. Кожна технологія має власні переваги та обмеження, що визначає її придатність для міських чи сільських територій. Для сільської місцевості, де прокладання кабелів часто економічно неефективне, важливе поєднання високошвидкісних технологій і простих у розгортанні рішень.

У цьому підрозділі розглядаються сучасні технології широкосмугового доступу до мережі Інтернет, їх технічні характеристики, сфери застосування, переваги та недоліки.

Технологія Ethernet стандарт IEEE 802.3 є однією з ключових технологій локальних мереж передачі даних, яка протягом кількох десятиліть зберігає статус базового стандарту для побудови мережевої інфраструктури різного масштабу. Його еволюція почалася у 1970-х роках у дослідницьких лабораторіях Xerox PARC, де був запропонований принцип обміну інформацією в загальному середовищі за допомогою механізму випадкового доступу. З часом технологія була стандартизована організацією IEEE у вигляді специфікацій сімейства 802.3, яку представлено в таблиці 1.1 що забезпечило її широке впровадження у промислових, корпоративних та побутових мережах. Ethernet від самого початку передбачав

використання електричного або оптичного каналу для передавання цифрових кадрів, однак його головною особливістю стала універсальність реалізації, що дозволило адаптувати технологію до різних середовищ передавання та різних вимог до швидкості [1].

Таблиця 1.1

Основні стандарти IEEE 802.3

Стандарт	Опис	Рік запровадження
802.3	10BASE5, («Товстий Ethernet»)	1983
802.3a	10BASE2 («Тонкий Ethernet»)	1985
802.3i	10BASE-T (кручена пара)	1990
802.3j	10BASE-F (оптичне волокно)	1993
802.3u	Fast Ethernet	1995
802.3z	Gigabit Ethernet	1997
802.3ab	Gigabit Ethernet по мідному кабелю 5-ї категорії	1999
802.3an	10GBaseT — 10 Gigabit Ethernet по мідному кабелю 6-ї або 7-ї категорії	2006
802.3ad	Агрегація каналів	1999
802.3x	Управління потоком в повнодуплексному режимі	1997

Основою Ethernet є структура кадру, яка визначає порядок розташування службових і корисних полів, необхідних для маршрутизації, контролю цілісності та забезпечення сумісності між пристроями. Використання MAC-адресування забезпечує унікальну ідентифікацію кожного мережевого інтерфейсу та дозволяє організовувати детерміновані або напівдетерміновані схеми доставки даних. У традиційних системах ранніх поколінь важливу роль відігравав метод доступу CSMA/CD, що передбачав прослуховування середовища та виявлення колізій. Хоча з розвитком комутованих мереж цей механізм практично втратив актуальність, він був фундаментальним на етапі формування принципів Ethernet і визначив його первісні обмеження щодо пропускної здатності та довжини сегментів.

Сучасний Ethernet значною мірою спирається на комутацію кадрів, що дозволило повністю усунути колізії та організувати повнодуплексний обмін між

вузлами. Поява комутаторів сприяла переходу від загального домену колізій до ізольованих каналів, де кожне з'єднання працює незалежно від інших. Це відкриває можливість масштабування пропускної здатності, зменшення затримок та підвищення рівня надійності мережевої взаємодії. Еволюція швидкісних стандартів від 10 Мбіт/с у початкових версіях до сучасних рішень рівня 100 Гбіт/с і вище зробила Ethernet універсальним засобом передачі даних не лише у локальних мережах, але й у магістральних і датацентрових структурах.

Важливою складовою розвитку технології стало розширення можливостей фізичного рівня. Крім класичних мідних середовищ на основі витої пари, Ethernet активно використовує оптичні волокна, які дозволяють організовувати високошвидкісні канали на значні відстані без суттєвих втрат сигналу. Стандартизаційні комітети IEEE постійно оновлюють вимоги щодо типів кабелів, довжини сегментів та параметрів передавання, забезпечуючи сумісність пристроїв різних виробників та підтримку обміну на різних швидкостях. Поряд із фізичними аспектами значного розвитку зазнали також механізми логічної сегментації, зокрема технологія VLAN, яка дозволяє структуризувати великі мережі та підвищувати їхню безпечність.

Сучасний Ethernet дедалі частіше розглядається як основа універсальної транспортної інфраструктури. Його інтеграція з протоколами верхніх рівнів сприяє використанню Ethernet у телекомунікаційних середовищах, мобільних мережах та промислових системах автоматизації. Розширення функціональних можливостей, таких як підтримка синхронізації часу, живлення по Ethernet - PoE чи механізми для передачі трафіка з гарантованими затримками, дозволяє використовувати його у сферах, де традиційно застосовувались спеціалізовані протоколи. Таким чином, Ethernet трансформувався з простої технології локального з'єднання у багатофункціональну платформу зв'язку, яка здатна задовольнити вимоги сучасних мережевих систем від домашніх сегментів до високонавантажених хмарних інфраструктур.

Технології xDSL -Технологія Digital Subscriber Line являє собою підхід до розширення смуги пропускання традиційних мідних абонентських телефонних

ліній, які з'єднують центральні телефонні станції з кінцевими користувачами. Впровадження DSL забезпечує значне підвищення швидкості цифрового з'єднання, зокрема, для доступу до глобальної мережі Інтернет, що є критично важливим для абонентів, які наразі використовують стандартний телефонний зв'язок [2].

Принципова перевага цієї технології полягає у її здатності використовувати вже існуючу інфраструктуру телефонних кабелів, усуваючи необхідність прокладання нових ліній зв'язку. Це дозволяє організувати цілодобовий широкосмуговий доступ до мережі Інтернет без порушення функціонування голосового телефонного зв'язку, що є вагомою перевагою з точки зору одночасного використання сервісів. Схему побудови мережі на основі технології DSL представлено на рисунку 1.1.

Різноманітність ітерацій технології DSL дозволяє користувачеві обирати швидкість передачі даних, яка відповідає індивідуальним вимогам, в діапазоні від 32 Кбіт/с до понад 50 Мбіт/с. Ця можливість відкриває шлях для використання стандартної телефонної лінії для підтримки вимогливих до пропускної здатності широкосмугових застосунків, таких як відео за запитом - Video on Demand або системи дистанційного навчання.

Сучасні реалізації технологій DSL трансформують звичайні мідні телефонні кабелі у високошвидкісні цифрові канали, забезпечуючи високошвидкісний доступ до Інтернету як для приватних домогосподарств, так і для суб'єктів малого та середнього бізнесу. При цьому, швидкість передачі даних є функціонально залежною виключно від двох ключових факторів: фізичної якості та довжини абонентської лінії, що з'єднує користувача з обладнанням провайдера. Як правило, постачальники послуг надають абоненту можливість вибору найбільш оптимального тарифного плану, що відповідає його індивідуальним потребам у швидкості передачі даних.

Для забезпечення одночасного функціонування кількох каналів телефонного зв'язку та високошвидкісного каналу передачі даних на одній фізичній абонентській лінії зв'язку є необхідною інтеграція спеціалізованого додаткового мережевого обладнання. Цей процес реалізується на основі принципу FDM,

характерного для технології xDSL. Застосування FDM вимагає встановлення наступних ключових компонентів. На стороні абонента - встановлюється спліттер або фільтр DSL, який виконує функцію розділення смуг частот. Цей пристрій ізолює низькочастотний спектр який призначений для аналогової телефонії, POTS від високочастотного спектру використовуваного для цифрової передачі даних, забезпечуючи їх незалежну роботу. На стороні провайдера це центральний вузол інтегрується мультиплексор доступу цифрової абонентської лінії DSLAM. DSLAM є активним обладнанням, яке агрегує та демультиплексує трафік від численних абонентів, спрямовуючи голосові дані у комутаційну мережу, а цифровий трафік — у магістральну мережу провайдера.

Таким чином, інтеграція вказаних пристроїв є обов'язковою умовою для мультиплексування різних сервісів на одній мідній парі.

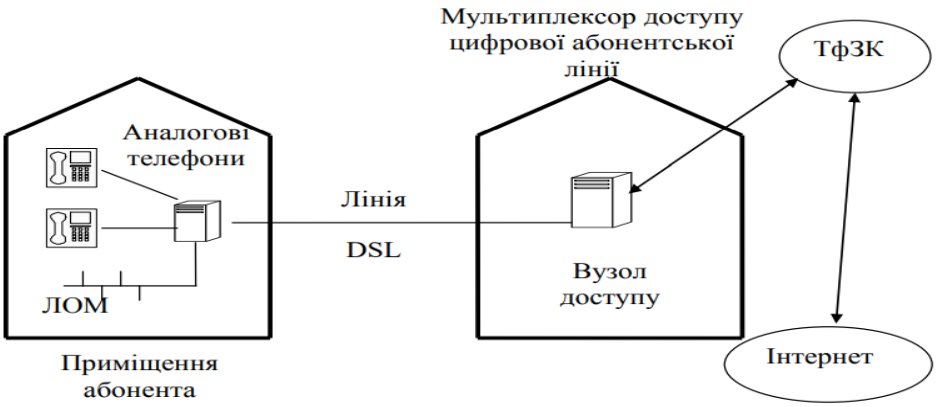


Рис. 1.1 Організація на одній абонентській лінії декількох каналів телефонного зв'язку

ADSL або асиметрична цифрова абонентська лінія - характеризується асиметричністю каналів передачі даних. Це проявляється у значному перевищенні швидкості низхідного потоку, від мережі до користувача, *downstream*, над швидкістю висхідного потоку, від користувача до мережі, *upstream*. Дана асиметрія, в поєднанні з режимом постійно встановленого з'єднання *always-on*, що виключає необхідність ініціалізації сесії шляхом набору номера, робить технологію ADSL оптимальною для застосувань, де домінує потреба у отриманні великих

обсягів інформації, наприклад, доступ до глобальної мережі Інтернет або локальних обчислювальних мереж.

Технічні характеристики ADSL визначають діапазон швидкостей:

1. Низхідний потік**:** від 1,5 Мбіт/с до 8 Мбіт/с.
2. Висхідний потік**:** від 640 Кбіт/с до 1,5 Мбіт/с.

Пропускна здатність ADSL є функцією відстані та якості абонентської лінії. Зокрема, передача даних зі швидкістю 1,54 Мбіт/с є досяжною на відстані до 5,5 км. по одній крученій парі проводів. Однак, для досягнення вищих швидкостей, таких як 6 – 8 Мбіт/с. , максимальна ефективна відстань обмежується 3,5 км. при використанні проводів діаметром 0,5 мм.

R-ADSL - цифрова абонентська лінія з адаптацією швидкості з'єднання є модифікацією ADSL, яка підтримує аналогічні діапазони швидкостей передачі даних, але впроваджує функцію адаптації швидкості. Ключова відмінність R-ADSL полягає у здатності системи автоматично коригувати швидкість передачі відповідно до фізичної довжини та електротехнічного стану конкретної абонентської крученої пари. Внаслідок цього, на різних телефонних лініях буде встановлюватися різна фактична швидкість передачі даних. Вибір оптимальної швидкості може відбуватися під час ініціалізації синхронізації лінії, протягом встановлення з'єднання, або ж на основі динамічного керуючого сигналу, що надходить від обладнання телефонної станції.

VDSL/VDSL2 забезпечує значно вищі швидкості до 100 Мбіт/с при роботі на коротших відстанях до 1 км. Ця технологія зазвичай застосовується для підключення абонентів у багатоквартирних будинках або як кінцевий сегмент архітектури FTTC. SDSL, на відміну від ADSL, пропонує однакову швидкість як для завантаження, так і для відправки даних. Завдяки цій симетрії, SDSL переважно використовується корпоративними клієнтами, яким необхідний стабільний і рівномірний канал, наприклад, для підтримки серверів та VPN-з'єднань.

З точки зору технічних характеристик, технології xDSL використовують принцип частотного розділення для одночасного функціонування голосового зв'язку та передачі даних. Критичною особливістю є пряма залежність пропускної

здатності від довжини абонентської лінії та її якості, а також чутливість до зовнішніх електромагнітних перешкод та фізичного старіння інфраструктури. xDSL є оптимальною для міських та приміських територій з наявними мідними телефонними мережами, проте її економічна доцільність знижується для сільських територій через значні відстані між абонентами та вузлами доступу.

Кабельний доступ HFC/DOCSIS - кабельний доступ до широкосмугових мереж базується на архітектурі HFC , що являє собою гібридну мережу, яка поєднує оптоволоконні магістралі та коаксіальний кабель. Оптоволоконний сегмент використовується для високошвидкісної передачі даних на значні відстані, забезпечуючи зв'язок між головною станцією Headend та оптичними вузлами. З цих вузлів сигнал до кінцевих абонентів доставляється через існуючу інфраструктуру коаксіального кабелю. Ця архітектура дозволяє постачальникам послуг використовувати вже існуючі мережі кабельного телебачення для надання послуг високошвидкісного доступу до Інтернету, значно знижуючи капітальні витрати на розгортання.

Керуючим стандартом для передачі цифрових даних через інфраструктуру HFC є DOCSIS. DOCSIS визначає протоколи та специфікації для організації двонаправленого високошвидкісного зв'язку. Сучасні ітерації стандарту, зокрема DOCSIS 3.1, використовують такі передові методи, як ортогональне частотне мультиплексування OFDM та більш ефективні схеми модуляції до 4096-QAM. Це дозволяє досягати значно вищих агрегованих швидкостей передачі даних: до 10 Гбіт/с. у низхідному потоці downstream та до 1–2 Гбіт/с. у висхідному потоці upstream. Важливою характеристикою кабельного доступу є спільне середовище передачі, що означає, що пропускна здатність у межах одного сегмента мережі ділиться між усіма підключеними абонентами. Схему архітектури гібридної волоконно-коаксіальної мережі HFC, що використовує стандарт DOCSIS представлено на рисунку 1.2.

Незважаючи на високу пропускну здатність, архітектура HFC має певні експлуатаційні обмеження. Одне з них — це чутливість коаксіального сегмента до шуму та радіочастотних перешкод, особливо у висхідному каналі. Крім того,

продуктивність системи схильна до впливу збільшення кількості абонентів, оскільки спільне середовище призводить до зменшення швидкості, доступної кожному окремому користувачеві в періоди пікового навантаження. Проте, можливість поступової модернізації мережі наприклад, перехід на DOCSIS 3.1 або подальше "оптичне наближення" до абонента забезпечує економічно ефективний шлях для підтримки конкурентоспроможних швидкостей доступу.

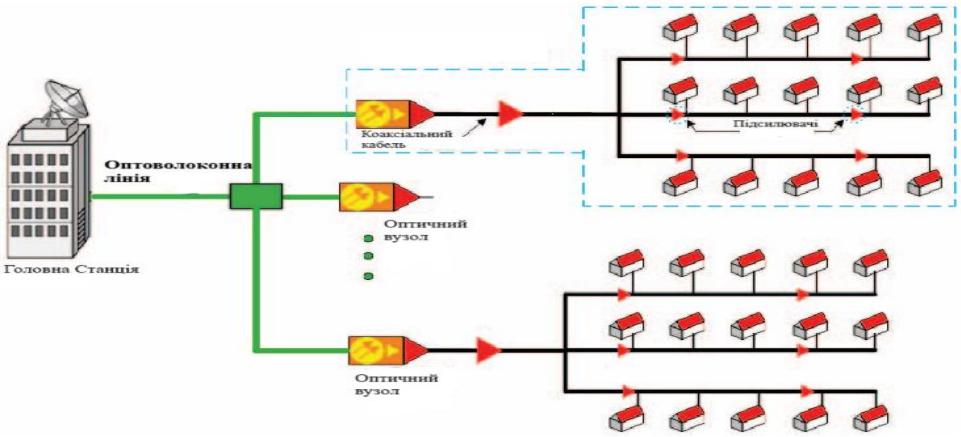


Рис. 1.2 Схема архітектури гібридної волоконно-коаксіальної мережі HFC, що використовує стандарт DOCSIS.

Оптоволоконні технології доступу FTTx/PON - технологія пасивних оптичних мереж PON, яка використовує архітектуру точка-багато точок - P2MP, є фундаментальною для забезпечення високошвидкісного широкосмугового доступу за концепцією FTTx. Усі стандарти PON використовують спільне волокно та пасивні оптичні сплітери для мінімізації потреби в активних електронних компонентах на трасі. Принципова різниця між основними ітераціями PON полягає у методах кадрування, швидкості передачі даних та ефективності використання смуги пропускання. Схему оптичної мережі PON представлено на рисунку 1.3.

Еволюція систем PON нині орієнтована на покращення ефективності використання спектра та здатності мережі масштабуватися під зростаючі потреби трафіку. Це досягається шляхом застосування нових підходів до мультиплексування та більш раціонального розподілу пропускної здатності між абонентськими вузлами. Стандарти нового покоління, серед яких XG-PON і XGS-

PON, підтримують різні режими симетричної та асиметричної передачі, що дає змогу конфігурувати мережеву інфраструктуру відповідно до специфіки навантаження. Завдяки цьому оптичні системи доступу набувають значно більшої адаптивності порівняно з застарілими технологіями та формують основу для переходу до масштабних високошвидкісних платформ, здатних забезпечити роботу сучасних сервісів і задовольнити зростаючі вимоги користувачів.

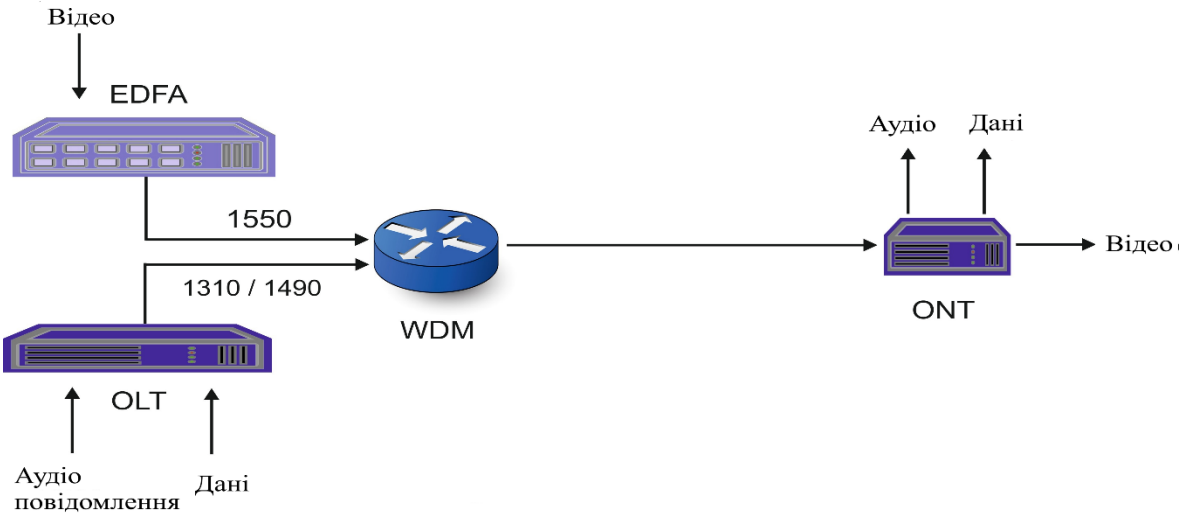


Рис. 1.3 Схема оптичної мережі PON

Архітектури FTTx класифікуються відповідно до точки закінчення оптичного волокна:

1. FTTH (Fiber To The Home) — волокно доводиться безпосередньо до абонентської квартири або будинку.
2. FTTB (Fiber To The Building) — волокно доходить до будівлі, а далі використовується внутрішня мідна мережа.
3. FTTC (Fiber To The Curb) — волокно доводиться до опорної точки на узбіччі, а кінцевий сегмент реалізується за допомогою мідного кабелю.

EPON - стандартизований IEEE 802.3ah, є однією з перших широко впроваджених технологій. Його ключовою особливістю є використання стандартних кадрів Ethernet, що спрощує інтеграцію з існуючими IP-мережами. EPON забезпечує симетричну швидкість передачі даних 1,25 Гбіт/с як у низхідному, так і у висхідному потоках. Мультиплексування у висхідному напрямку здійснюється за протоколом MPCP, який керує доступом ONU до

середовища спільного волокна, забезпечуючи ефективне використання часових слотів TDMA.

GPON, розроблений ITU-T G.984, є найбільш поширеним стандартом у світі. На відміну від EPON, GPON використовує власний метод кадрування, відомий як GEM - GPON Encapsulation Method, що забезпечує високу ефективність передачі як пакетів даних, так і TDM-трафіку наприклад, традиційної телефонії. GPON є асиметричним: він забезпечує швидкість низхідного потоку до 2,5 Гбіт/с і висхідного потоку до 1,2 Гбіт/с. Вища швидкість у низхідному напрямку ідеально відповідає типовим потребам кінцевих користувачів, де обсяг завантажуваної інформації значно перевищує обсяг переданої.

XG-PON -10 Gigabit Passive Optical Network, який є частиною стандартів NG-PON1, являє собою технологію наступного покоління, розроблену для задоволення зростаючих потреб у пропускній здатності. XG-PON використовує інший набір довжин хвиль, що дозволяє йому співіснувати з GPON на одному волокні. Він також є асиметричним, але зі значно вищими показниками: низхідний потік досягає 10 Гбіт/с, тоді як висхідний потік залишається на рівні 2,5 Гбіт/с. Ця технологія розглядається як ефективний шлях модернізації існуючих GPON-мереж без повної заміни оптичної інфраструктури, що дозволяє надавати сервіси з надвисокою пропускною здатністю [3].

Для забезпечення фізичної сумісності та розширення діапазону дії мереж, які використовують різнорідні середовища передачі даних, необхідне спеціалізоване обладнання. У контексті оптичних мереж FTTx часто виникає потреба у з'єднанні оптичного сегмента з традиційною мідною інфраструктурою. Саме тут ключову роль відіграє медіаконвертор.

Функціональне призначення медіаконверторів - медіаконвертори є важливими пристроями, які слугують для забезпечення фізичної сумісності мережевих сегментів, що використовують різні типи середовищ передачі. Їхня основна функція полягає у перетворенні сигналів, що передаються по мідному кабелю наприклад, кручена пара у відповідні сигнали для оптичного волокна, і навпаки

Ці пристрої працюють на першому рівні моделі OSI, здійснюючи прозоре перетворення електричних імпульсів на світлові та навпаки, не змінюючи при цьому вмісту даних. Медіаконвертори є критично необхідними для розширення діапазону дії мереж Ethernet, оскільки оптичне волокно забезпечує передачу даних на значно більші відстані та з вищою стійкістю до електромагнітних перешкод, ніж мідний кабель. Вони часто використовуються для підключення мідних локальних мереж LAN до волоконно-оптичних магістралей або для реалізації кінцевого мідного сегменту у системах FTTx, де оптичне волокно не доходить безпосередньо до кінцевого пристрою абонента.

Бездротові технології - бездротові технології доступу являють собою критично важливий сегмент телекомунікаційної інфраструктури, що забезпечує передачу даних між двома або більше точками без використання фізичного кабельного середовища. Їхнє впровадження є особливо актуальним у географічно складних або віддалених районах, а також у випадках, коли прокладання оптичного або мідного кабелю є економічно невигідним або фізично неможливим. Принцип функціонування базується на використанні радіочастотного спектра для модуляції та розповсюдження електромагнітних хвиль, що дозволяє досягти високої мобільності та оперативної організації зв'язку. У порівнянні з провідними рішеннями, бездротові системи забезпечують значно вищу гнучкість розгортання та швидкість підключення нових абонентів.

На сучасному етапі розвитку мобільних комунікацій домінуюче становище займають стандарти, що забезпечують широкосмуговий доступ. Зокрема, технології LTE 4G та 5G є основними рушіями цифрового підключення. LTE забезпечує швидкості до 100 Мбіт/с і характеризується великим радіусом дії, до 10 км від базової станції, що робить її ефективною для покриття великих територій, включаючи сільську місцевість. З іншого боку, 5G представляє собою суттєвий стрибок у продуктивності, пропонуючи потенційну швидкість до 10 Гбіт/с та надзвичайно низьку затримку latency, що є критичним для застосунків Інтернету речей IoT та високоточних систем реального часу. Хоча діапазон покриття окремої базової станції 5G часто менший, особливо при використанні високочастотних

міліметрових хвиль mmWave, це компенсується високою щільністю з'єднань та пропускною здатністю.

Головною перевагою бездротових технологій є простота та швидкість розгортання інфраструктури, оскільки вони усувають необхідність у виконанні дорогих та тривалих земляних робіт для прокладання кабелю. Це забезпечує високу економічну ефективність при обслуговуванні розсіяної абонентської бази. Однак, ці технології мають і суттєві експлуатаційні недоліки. Швидкість та стабільність зв'язку в значній мірі залежать від погодних умов, наприклад дощ, сніг, туман, які можуть спричиняти загасання радіосигналу. Крім того, бездротове середовище є спільним ресурсом, тому при високому навантаженні абоненти можуть відчувати значне зниження пропускної здатності, що є наслідком обмеженої пропускної здатності на одного користувача у перевантажених секторах. Ефективність також залежить від прямої видимості та відсутності фізичних перешкод, що ускладнює забезпечення стабільного сервісу в умовах щільної міської забудови.

Окрім мобільних стандартів, варто також згадати технологію WiMAX, яка була розроблена для забезпечення широкосмугового доступу на великих відстанях. WiMAX, стандартизований як IEEE 802.16, позиціонувався як рішення для створення великих зон покриття, зокрема у регіонах, де розгортання кабельної інфраструктури є непрактичним. Ця технологія дозволяла передавати дані на відстань до 50 км за умови прямої видимості - Line-of-Sight, LOS та забезпечувала пропускну здатність, достатню для підтримки послуг останньої милі.

На відміну від Wi-Fi IEEE 802.11, який орієнтований на локальні мережі, WiMAX був спроєктований як мережа міського чи регіонального масштабу MAN. Його ключовою перевагою є велика дальність дії та відносно висока стійкість до перешкод у порівнянні з іншими бездротовими технологіями тих часів. Незважаючи на те, що WiMAX значною мірою був витіснений і комерційно замінений технологіями LTE та 5G, він відіграв важливу роль як перехідне рішення для надання широкосмугового доступу в районах з недостатньо розвиненою інфраструктурою. [4] Недоліки WiMAX включали складність ліцензування частот,

високу вартість абонентського обладнання та меншу мобільність, ніж у сучасних стільникових мережах.

1.2 Порівняння технологій GPON, XG-PON, XGS-PON та NG-PON2

Пасивні оптичні мережі протягом останніх десятиліть стали ключовою технологічною платформою для побудови сучасних систем фіксованого доступу. У межах цього підрозділу здійснюється порівняльний аналіз технологій GPON, XG-PON, XGS-PON та NG-PON2, які послідовно формували етапи еволюції оптичних мереж доступу від гігабітних до багатогігабітних і, в перспективі, терабітних рівнів продуктивності. Розвиток стандартів PON відображає загальну тенденцію телекомунікаційної галузі, що характеризується зростанням вимог до пропускної здатності, затримок, надійності та еластичності мережевих ресурсів. У цьому контексті поява нових поколінь PON не є ізольованим процесом, а відповідає загальному переходу інформаційних систем до високої щільності трафіку, мультисервісності та інтеграції з хмарними інфраструктурами.

Архітектури GPON, XG-PON, XGS-PON та NG-PON2 мають спільну базову концепцію — використання оптичної розподільної мережі ODN, заснованої на пасивних компонентах, у першу чергу на оптичних сплітерах, що дозволяє суттєво зменшити операційні витрати та підвищити довгострокову надійність системи. Проте саме інженерні особливості, закладені в кожному окремому поколінні PON, визначають їх ефективність, пропускну здатність, допустимі втрати, можливість модернізації та рівень сумісності зі спадковою інфраструктурою. Візуальне порівняння загальної архітектури зазначених технологій може бути представлено на рисунку 1.4, де схематично відображено організацію логічних каналів та особливості доступу до середовища [5].

У класичній технології GPON реалізовано архітектуру, оптимізовану під умови початку 2000-х років, у яких споживачам було достатньо гігабітного рівня пропускної здатності. GPON працює з використанням асиметричної моделі, де швидкість у напрямку до абонента традиційно значно більша, ніж у напрямку від

нього. Такий підхід відповідав тогочасним сценаріям використання мережі, коли обсяг трафіку користувача був переважно спрямований на споживання контенту. Архітектурно GPON використовує фіксовані довжини хвиль для downstream та upstream, що спрощує систему, але обмежує можливість масштабування у майбутньому. Попри це GPON залишається поширеним рішенням для масового доступу через високий рівень стандартизації та доступність обладнання.

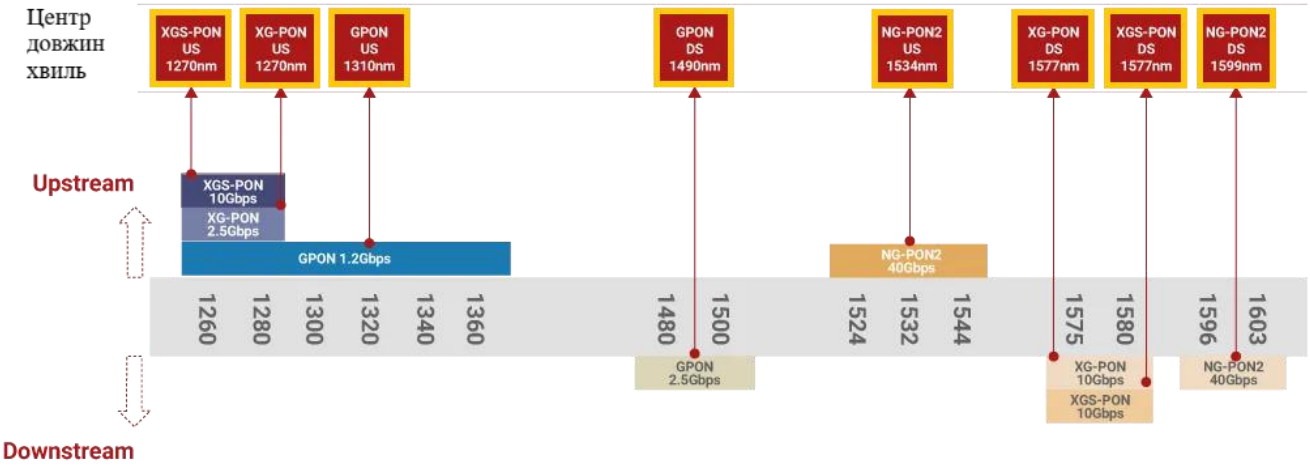


Рис 1.4 Візуальне порівняння загальної архітектури зазначених технологій

Поява технології XG-PON стала відповіддю на зростання обсягів трафіку, пов’язаних із розвитком відеостримінгових сервісів, інтерактивних додатків та початком активного впровадження хмарних платформ. У цьому стандарті було збережено базову архітектуру GPON, проте підвищено пропускну здатність у напрямку downstream, що дозволило підтримувати вимоги, які перевищують можливості попереднього покоління. Водночас було забезпечено можливість одночасної роботи GPON і XG-PON на одній ODN, що значно полегшило процес міграції операторів без необхідності повної реконструкції мережі. Саме ця сумісність, відображена у таблиці 1.2, є одним із ключових факторів успіху XG-PON як проміжного етапу переходу до багатогігабітних мереж.

У свою чергу XGS-PON став логічним продовженням попереднього стандарту, однак він суттєво відрізняється концептуальною орієнтацією на симетричні види трафіку. Зростання популярності сервісів, які вимагають високого аплінку — таких як відеоконференції, віддалена робота, хмарне зберігання та

передавання файлів великого обсягу — потребувало зміни архітектури PON у сторону симетрії. XGS-PON є однією з перших масових технологій, яка пропонує рівнозначну швидкість у напрямку до та від абонента, що робить її оптимальним рішенням для снового покоління інтелектуальних сервісів. У літературі цей стандарт часто наводиться як компроміс між необхідністю збільшення продуктивності та мінімальністю змін у фізичній інфраструктурі.

Таблиця 1.2

Порівняльні характеристики технологій GPON, XG-PON, XGS-PON та NG-PON2

Параметр	GPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2
Максимальна швидкість вниз (Gb/s)	2.488	10	10	До 40
Максимальна швидкість вгору (Gb/s)	1.244	2.5	10	До 10
Тип симетрії	Асиметрична	Асиметрична	Симетрична	Симетрична, багатоканальна
Довжина хвилі (downstream)	1490 нм	1577 нм	1577 нм	1596–1603 нм
Довжина хвилі (upstream)	1310 нм	1270 нм	1270 нм	1524–1544 нм
Типи модуляції	NRZ	NRZ	NRZ	TWDM-PON (WDM + TDM)
Ефективна дальність	До 20 км	До 20 км	До 20 км	40+ км
Спліт-коефіцієнт	До 1:128	До 1:128	До 1:128	1:256
Сумісність з попередніми поколіннями	Немає	Спільне ODN з GPON	Спільне ODN з GPON	Сумісність за ODN; паралельна робота на різних λ
Рівень складності ODN	Базовий	Той самий, що у GPON	Той самий, що у GPON	Підвищений (вища точність та контроль втрат)

Продовження таблиці 1.2

Підтримка DBA	Стандартна	Покращена	Покращена	Розширена з урахуванням багатохвильовості

Технологія NG-PON2, яка є найбільш прогресивною та інженерно складною серед розглянутих, реалізує принципово іншу концепцію побудови мережі, орієнтовану на багатохвильову архітектуру. У ній застосовано WDM-мультиплексування, що дозволяє одночасно використовувати декілька довжин хвиль для підвищення сумарної пропускної здатності та забезпечення можливості динамічного перенесення абонентів між різними хвилями залежно від навантаження. Саме ця властивість дає підстави розглядати NG-PON2 як платформу для довгострокового розвитку доступових мереж.

Порівнюючи фізичний рівень цих технологій, варто відзначити, що кожне наступне покоління PON намагається забезпечити збільшення пропускної здатності без радикального ускладнення існуючої оптичної інфраструктури. GPON використовує схему з фіксованими довжинами хвиль для downstream - 1490 нм та upstream - 1310 нм, що було достатньо для початкового етапу впровадження широкосмугового доступу. XG-PON зберігає аналогічний підхід, однак переносить робочі довжини хвиль downstream у спектр 1577 нм, де менше перешкод від попередніх технологій, що дозволяє забезпечити співіснування із GPON на одній ODN. Водночас upstream XG-PON використовує діапазон 1270 нм, що забезпечує чітке частотне розділення каналів. У таблиці 1.3 може бути наведене детальне порівняння робочих довжин хвиль цих систем.

Таблиця 1.3

Порівняння характеристик фізичного рівня GPON, XG-PON, XGS-PON та NG-PON2

Параметр фізичного рівня	GPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2
Робоча довжина хвилі (DL)	1490 нм	1577 нм	1577 нм	1596–1603 нм

Продовження таблиці 1.3

Робоча довжина хвилі (UL)	1310 нм	1270 нм	1270 нм	1524–1544 нм
Оптичний бюджет	28–32 дБ	29–31 дБ	29–31 дБ	33–35 дБ
Чутливість приймача	Середня	Вища	Вища	Дуже висока
Стійкість до дисперсії	Висока	Висока	Висока	Дуже висока
Дозволені втрати на сплітерах	До ~15 дБ	До ~18 дБ	До ~18 дБ	До ~22 дБ

XGS-PON застосовує аналогічний хвильовий план, проте вводить нову модель узгоджених параметрів симетричного каналу, що дозволяє досягти рівності обох напрямків передачі. Це призводить до деякого ускладнення вимог до лазерних модуляторів, проте забезпечує суттєву гнучкість у підтримці нових типів сервісів. NG-PON2 ж застосовує принципово іншу архітектуру: система може одночасно використовувати 4 або 8 довжин хвиль, кожна з яких забезпечує окремий логічний канал. Це підвищує не лише сукупну пропускну здатність, але й живучість мережі, оскільки у випадку перевантаження або відмови окремої хвилі трафік може бути перенаправлений на іншу. Така функціональність, яку часто ілюструють на рисунку 1.5, є важливою характеристикою систем наступного покоління.

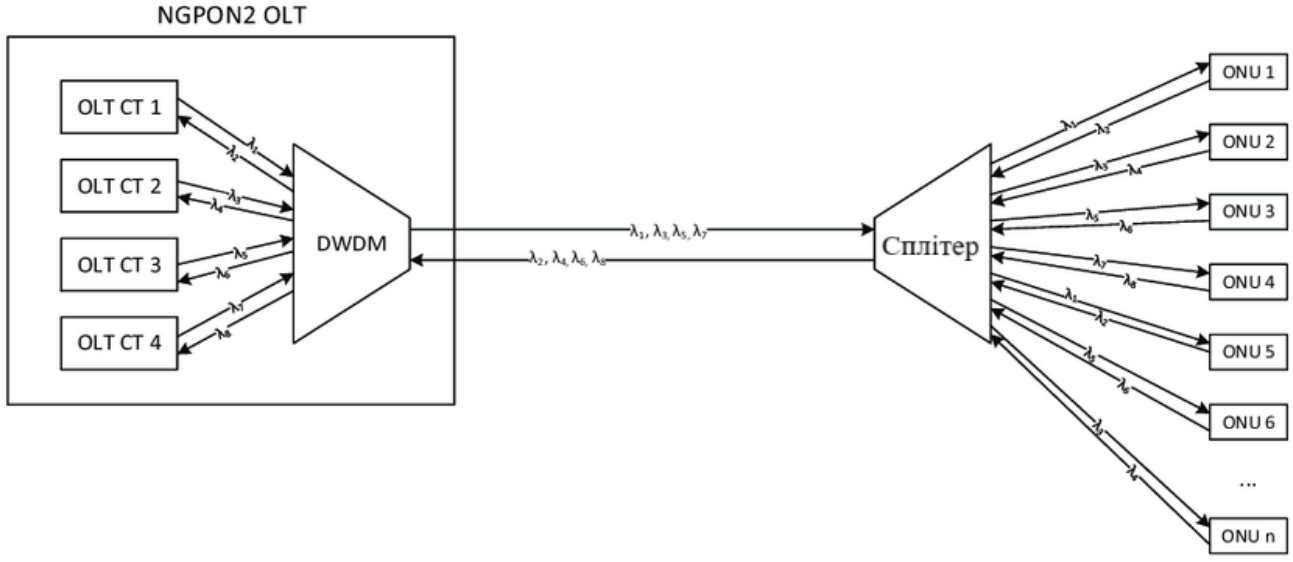


Рис. 1.5 Архітектура мережі на базі технології NG-PON2

Аналіз кадрування та протоколів, що використовуються у GPON, XG-PON, XGS-PON та NG-PON2, також демонструє еволюцію від відносно простих структур GEM-фреймів до більш гнучких та ефективних моделей організації трафіку. GPON використовує метод GEM, який дозволяє інкапсуляцію будь-якого типу трафіку, включно з Ethernet та TDM [6]. Такий підхід був надзвичайно ефективним для підтримки мультисервісності епохи конвергентних мереж. XG-PON і XGS-PON зберегли цю концепцію, проте оптимізували структуру кадрів для забезпечення меншої затримки та підвищеної ефективності використання смуги пропускання. Зокрема, вдосконалена система динамічного розподілу пропускної здатності DBA дозволяє точніше адаптувати полоси до реального навантаження від абонента. NG-PON2 застосовує ту ж базову модель кадрування, проте інтегрує її з механізмами керування хвильовими ресурсами, що дозволяє забезпечити більш високий рівень QoS і гнучкості у використанні каналу.

Питання ефективності смуги пропускання є одним з ключових у порівнянні зазначених технологій. GPON, незважаючи на відносно невисоку загальну пропускну здатність, демонструє високий коефіцієнт корисного навантаження на одиницю спектра, що зробило технологію економічно привабливою на ранніх етапах розгортання широкосмугових мереж. Однак із часом виявилося, що асиметрична модель передачі стає обмежувальним фактором, особливо в умовах збільшення обсягів аплінку. XG-PON вирішив проблему upstream збільшенням частотного ресурсу та оптимізацією механізмів DBA, проте залишається асиметричним у природі. XGS-PON повністю усуває цей недолік завдяки симетричній пропускній здатності 10 Гбіт/с, покращуючи ефективність моделі доступу в мережах зі змішаними типами навантаження.

NG-PON2 виходить на новий рівень завдяки можливості агрегувати пропускну здатність за рахунок сумування кількох незалежних хвиль. Це забезпечує не лише надзвичайно високу сумарну пропускну здатність, але й більш рівномірний розподіл ресурсів між абонентами. У разі необхідності оператор може гнучко додати нову довжину хвилі або перенести групу абонентів на інший канал без фізичної реконструкції мережі. Така властивість робить NG-PON2 потенційною

платформою для розбудови доступу, орієнтованого на моделі майбутнього, включно з мережами 5G FWA, широкомасштабним IoT та сервісами з високою інтенсивністю аплінку.

Принципи формування та розподілу ресурсу в мережах XG-PON

Функціонування мереж XG-PON ґрунтується на цілій сукупності технічних та логічних механізмів, які забезпечують узгоджену взаємодію між оптичним лінійним терміналом та множиною абонентських оптичних мережевих блоків. Розподіл ресурсу в такому середовищі є не просто процесом призначення окремих часових або частотних ділянок, а складною системою керування, що має враховувати фізичні параметри лінії, характер трафіку, пріоритетність сервісів, топологічні особливості мережі та динамічну зміну навантаження у часі. Саме через це XG-PON вважається одним із найбільш адаптивних і технологічно зрілих рішень серед пасивних оптичних мереж нового покоління.

Однією з головних особливостей розподілу ресурсу в XG-PON є асиметрична модель передавання даних, коли швидкість у нисхідному напрямку значно перевищує швидкість у висхідному. Така архітектура продиктована реальною структурою трафіку сучасних мереж доступу, у яких переважає споживання потокового контенту, мультимедійних сервісів, хмарних застосунків та відеотрансляцій. Проте, навіть за значної асиметрії, система повинна гарантувати стабільний режим роботи для висхідного каналу, адже саме він формує зворотні запити, контрольні та керувальні пакети, а також передає інформацію від абонента до мережевих ресурсів провайдера. Баланс між цими напрямками досягається шляхом впровадження складних алгоритмів опрацювання й динамічного виділення пропускної здатності, які керують доступом для кожного ONU в окремий момент часу.

Важливою характеристикою є те, що XG-PON використовує суворо синхронізований часовий поділ каналу у висхідному напрямку. Кожний ONU отримує персоналізований часовий слот, у межах якого може передавати інформацію. Проте, на відміну від систем попередніх поколінь, де часові інтервали часто мали статичну природу, у XG-PON впроваджено адаптивні режими, які

враховують затримки на оптичних ділянках, відстань до конкретного абонента, швидкість накопичення черг та навіть тип запиту. Унаслідок цього зменшуються холості паузи, а корисний трафік передається максимально ефективно. Власне, синхронізація всіх ONU за допомогою процедури ранжування дозволяє системі компенсувати фізичні затримки, що виникають через різну віддаленість абонентських вузлів.

У нисхідному каналі принцип формування ресурсу базується на широкомовній моделі. Оптичний сигнал, сформований OLT, передається усім ONU одночасно, проте завдяки структурованому кадру кожен абонент отримує лише ту інформацію, яка йому адресована. Для цього застосовуються механізми фрагментації та шифрування на рівні GEM-кадрів, що виключає можливість доступу до даних інших користувачів. Крім того, така модель забезпечує високу ефективність використання спектру, оскільки немає потреби формувати окремі потоки для кожного абонента, а широкомовний кадровий потік автоматично масштабується на будь-яку кількість підключених вузлів.

Особливу увагу варто звернути на механізм динамічного розподілу пропускної здатності DBA, який є центральною ланкою системи. Його значення виходить за межі простого виділення пропускної здатності. DBA фактично виконує роль інтелектуального монітора трафіку, який аналізує стан черг кожного ONU, типи транспортних контейнерів, наявність гарантованих чи негарантованих сервісів і відповідно коригує розмір часових інтервалів. Це означає, що система здатна миттєво реагувати на зміну навантаження, наприклад, у ситуаціях, коли кілька абонентів активують відеоконференції або розпочинають передавання великих масивів інформації у хмарні сервіси. У такі моменти DBA не лише перерозподіляє ресурси, а й оптимізує їх таким чином, щоб мінімізувати втрати пакетів, зменшити затримки та гарантувати пропускну здатність для критично важливих сервісів.

Фундаментальною складовою цих процесів є використання T-CONT – логічних транспортних контейнерів, що забезпечують різний рівень гарантій для абонентського трафіку. Кожен тип T-CONT використовується для певного класу

послуг: від жорстко гарантованих каналів до найменш пріоритетних даних з можливістю використання лише вільної пропускної здатності. Така структура дозволяє створювати гнучкі моделі обслуговування, у яких одному абонентові можуть одночасно надаватися і гарантовані ресурси, і динамічно виділені додаткові. Унаслідок цього навіть у пікові періоди навантаження мережа лишається стабільною, а якість сервісу для користувача не погіршується.

Не менш важливою є оптична модель розподілу ресурсу. Використання різних довжин хвиль для висхідного і нисхідного каналів дозволяє уникнути оптичних колізій. Такий підхід розширює ефективну смугу пропускання й забезпечує одночасну роботу всіх абонентів без зниження продуктивності. Система здатна підтримувати значні відстані та великі коефіцієнти розгалуження завдяки тому, що оптичний сигнал у XG-PON має підвищену енергетичну стійкість, а сучасні приймальні модулі здатні працювати з дуже слабкими сигналами. Це робить технологію надзвичайно привабливою для розгортання в сільській місцевості, де відстані між абонентами та вузлами доступу є значними, а щільність населення — низькою.

Система XG-PON також передбачає використання спеціальних механізмів компенсації втрат на різних ділянках мережі, включно з внутрішньоволоконним згасанням, втратами на розгалужувачах та відбиттями. Комплекс цих функцій спрямований на стабілізацію потужності сигналу, що особливо актуально у великих топологіях із багаторівневим розгалуженням. Такі підходи дозволяють зменшити вимоги до активного обладнання та забезпечують високу енергоефективність усієї системи.

Взаємодія всіх зазначених механізмів формує унікальну модель розподілу ресурсу, яка може адаптуватися практично до будь-яких умов. XG-PON здатний підтримувати як стабільне навантаження у великих міських агломераціях, так і нерівномірний трафік у сільській місцевості, де в різні періоди доби спостерігаються різні потреби абонентів. Завдяки цьому технологія має універсальний характер і може застосовуватися як у масштабних щільних мережах,

так і в низьконаселених регіонах, забезпечуючи при цьому високий рівень якості послуг.

1.3 Аналіз вимог, технічних обмежень і специфіки розгортання мереж доступу у сільській місцевості

Розгортання мереж доступу нового покоління в сільських регіонах характеризується низкою системних особливостей, що суттєво відрізняють такі території від урбанізованих зон і формують специфічні вимоги до вибору технологій, параметрів побудови та принципів подальшої експлуатації. На відміну від міських агломерацій, де існує значно вища концентрація користувачів, щільніша забудова, наявність розвиненої телекомунікаційної інфраструктури та можливість гнучко масштабувати мережі з мінімальними капітальними витратами, сільська місцевість характеризується низькою щільністю населення, великими відстанями між житловими об’єктами, фрагментарною архітектурою поселень, а також слабко розвиненим або повністю відсутнім підґрунтям для прокладання ліній зв’язку. Крім того, зовнішні фактори, такі як геоморфологічні особливості територій, складність рельєфу, наявність приватизованих земельних ділянок та інфраструктурних обмежень, значно ускладнюють організацію кабельних ліній, що збільшує загальну вартість волоконно-оптичного підключення.

Одним із ключових викликів у сільських мережах доступу є необхідність забезпечення гарантованої пропускної здатності в умовах нерівномірного та сезонно змінного навантаження на мережу. Сільське населення демонструє суттєво інший профіль споживання трафіку, де пікова активність може бути зумовлена не лише часовими характеристиками добового циклу, а й сезонними факторами, пов’язаними, зокрема, з аграрним циклом, туристичною активністю або специфікою роботи сільських підприємств. Наприклад, у періоди збору врожаю підвищується інтенсивність передачі даних від систем моніторингу сільськогосподарського обладнання, метеостанцій, логістичних служб і технологічних комплексів, що призводить до збільшення навантаження на uplink-

канал. З іншого боку, зимовий період може характеризуватися зростанням стрімінгової активності населення, збільшенням обсягів споживання відеоконтенту та хмарних сервісів, що підвищує вимоги до downlink-пропускної здатності [7].

У цьому контексті актуальним є порівняння можливості розгортання різних поколінь PON-технологій. Традиційний GPON, попри свою високу надійність і поширеність, в умовах сільських регіонів починає обмежувати операторів у питаннях масштабованості та підтримання високої якості послуг. Обмежена пропускна здатність у напрямку низхідного каналу, а також невисока загальна ефективність у ситуаціях з великою кількістю абонентів у рамках одного дерева ODN, може призвести до деградації швидкісних параметрів у години пікового навантаження. Тому для більшості сучасних задач розумним вибором є перехід на XG-PON або XGS-PON, які дозволяють отримати на порядок вищу сумарну пропускну здатність, не змінюючи при цьому структуру пасивної оптичної мережі, а лише модернізуючи активні елементи на рівні OLT та ONU.

Розробка мережі доступу для сільської місцевості вимагає урахування специфіки просторової організації об’єктів, серед яких можна виділити кілька типових морфологічних форм поселень: компактні села з відносно малою відстанню між будинками, лінійні поселення, що формуються вздовж однієї основної дороги або річки, групові поселення хутірного типу з дуже низькою щільністю забудови та великі розтягнуті території, де домогосподарства розміщені на значних відстанях одне від одного. Кожен тип структури впливає на методи проектування оптичної мережі, визначаючи необхідну довжину ліній, кількість оптичних муфт, рівень розгалуження, конфігурацію сплітерів і набір технічних параметрів OLT-обладнання. Наприклад, у компактних селах можливе застосування класичної схеми з відносно рівномірним розподілом навантаження та розміщенням сплітерів у центрі зони покриття, тоді як у лінійних поселеннях може потребуватися каскадне розташування сплітерів або навіть використання комбінованої топології з частковим відгалуженням. Типи проектування оптичної мережі зображено на малюнку 1.6.

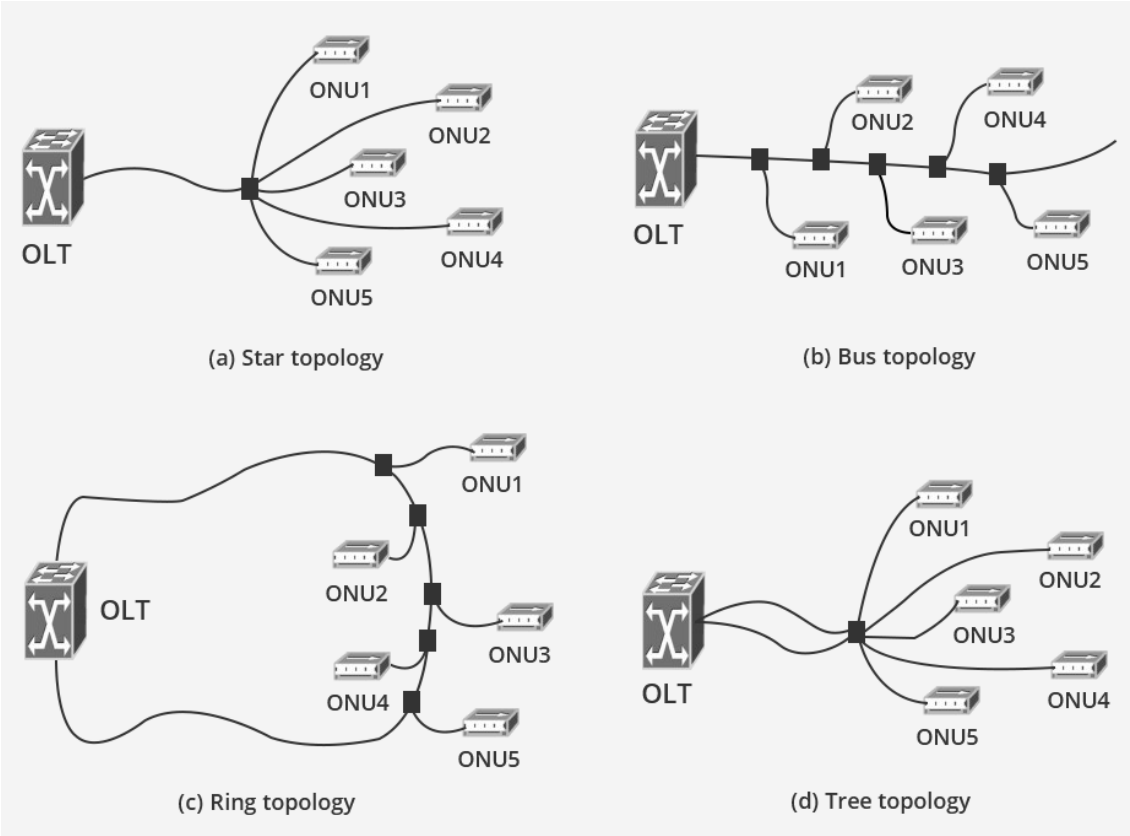


Рис. 1.6 Топології PON мереж

Важливою характеристикою сільської мережі доступу є вимога мінімізувати кількість точок обслуговування та технічного втручання. Пасивні оптичні мережі є зручною технологією, оскільки вони не потребують активних елементів між узгодженими вузлами, що суттєво спрощує експлуатацію та знижує потенційні ризики виходу обладнання з ладу. Однак використання пасивних компонентів у великих розтягнутих мережах вимагає ретельного опрацювання параметрів оптичного бюджету, оскільки значні відстані до кінцевих домогосподарств можуть призвести до критичних втрат сигналу. Технології XG-PON і XGS-PON, завдяки використанню сучасних схем модуляції та підвищеній чутливості приймачів, здатні забезпечити стабільний оптичний бюджет навіть у складних топологіях з великими відстанями та декількома етапами розгалуження [8].

Одним з найбільш критичних аспектів є економічна ефективність. В умовах низької щільності абонентів витрати на прокладання волоконно-оптичної інфраструктури в розрахунку на одного користувача можуть бути значно вищими, ніж у міських регіонах. Це зумовлює потребу максимально зменшувати довжину

ліній за рахунок використання повітряної інфраструктури, наявних опор електропостачання або місцевих інженерних споруд. При цьому перехід на XG-PON або XGS-PON дозволяє уникнути необхідності повторного інвестування в модернізацію ODN у майбутньому, що підвищує загальну окупність проєкту. Оператори, які прагнуть обслуговувати сільські райони, часто використовують комбіновані стратегії, застосовуючи одночасно GPON і XG-PON на різних ділянках мережі або навіть в межах одного населеного пункту, що дозволяє оптимізувати співвідношення витрат і пропускної здатності.

Одним із ключових аспектів планування оптичних мереж доступу в сільських регіонах є врахування просторової фрагментованості абонентської бази, що суттєво відрізняється від щільної міської забудови. Територіальна розосередженість користувачів генерує підвищені вимоги до протяжності оптичної інфраструктури, що безпосередньо впливає на структуру оптичної розподільчої мережі ODN, конфігурацію сплітерів та необхідність застосування каскадних топологій розгалуження. У цьому контексті технологія XG-PON демонструє вищу стійкість до збільшення довжини тракту порівняно з традиційним GPON, що зумовлено як більшим бюджетом потужності, так і підвищеною толерантністю до втрат у розгалужувальних елементах.

Ще одним системоутворюючим чинником є зміна характеру споживання трафіку в сільських поселеннях унаслідок розширення доступу до цифрових сервісів — від класичного веб-серфінгу до потокових мультимедійних платформ, інтерактивного телебачення, хмарних сервісів та застосунків для дистанційної роботи. Дослідження останніх років демонструють, що середньодобове споживання трафіку у сільських користувачів наближається до міських показників, проте характеризується більш вираженою піковою нерівномірністю, що вимагає від мережі вищої пропускної здатності й адаптивності до короткострокових навантажень. У цьому контексті XG-PON здатний забезпечити підвищену ефективність розподілу смуги пропускання між абонентами завдяки більш сучасним алгоритмам керування доступом до середовища DBA, що мінімізує деградацію якості сервісу під час пікових навантажень.

Водночас запровадження високошвидкісних оптичних технологій у сільській місцевості вимагає врахування специфічних особливостей ландшафту. Зокрема, нерівний рельєф, польові дороги, наявність великих відстаней між присадибними ділянками та обмеженість існуючої каналізації зв’язку істотно ускладнюють використання класичного підземного способу прокладання. Це зумовлює зростання актуальності підвісного прокладання волоконно-оптичних ліній, що дає змогу значно зменшити капітальні витрати, проте потребує врахування додаткових навантажень на опори, впливу температурних коливань та ризиків механічних пошкоджень. Технологія XG-PON, незважаючи на свої високі вимоги до оптичного бюджету, демонструє достатній запас потужності навіть у разі реалізації довгих підвісних ділянок із мінімальною кількістю з’єднань.

Слід також зазначити, що економічні моделі розгортання мережі у селі істотно залежать від структури населеного пункту. Наприклад, у компактному селі, де щільність домогосподарств є відносно високою, проєктування ODN може бути реалізоване на основі централізованої схеми з одним або двома оптичними розподільчими пунктами, що оптимізує кількість сплітерних каскадів. У випадку лінійних сіл або населених пунктів із протяжною головною вулицею найбільш економічно доцільним є застосування послідовної каскадної структури ODN, де сплітери розміщуються на різних етапах магістрального маршруту [9]. У розтягнутих або хутірних поселеннях розгортання мережі потребує використання радіальних або змішаних топологій із множинними вузлами дистрибуції, що, хоча й збільшує капітальні витрати, проте забезпечує оптимальний баланс між протяжністю волокон і якістю сервісу.

Вибір між різними технологіями PON у сільській місцевості повинен враховувати прогнозований розвиток абонентської бази. З огляду на те, що інтернет-споживання у селах демонструє стабільну тенденцію до зростання, застосування GPON у нових проєктах може бути економічно доцільним лише у випадках дуже низької щільності абонентів, де капіталізація мережі є критично обмеженою. Натомість XG-PON забезпечує вищий запас пропускної здатності, що є важливим у сценаріях майбутнього збільшення кількості користувачів та появи

нових високочастотних сервісів, таких як відеоспостереження високої чіткості, системи розумного села та IoT-інфраструктура для аграрних потреб.

Не менш важливою є оцінка експлуатаційних витрат упродовж життєвого циклу мережі. В умовах села ремонтно-відновлювальні роботи мають значно більшу тривалість через географічну віддаленість об’єктів та складні погодні умови. Тому важливим критерієм вибору технології є наявність можливості централізованого моніторингу, функцій діагностики лінії та ефективних механізмів виявлення пошкоджень. XG-PON, завдяки поліпшеним параметрам синхронізації та удосконаленим оптичним передавачам, демонструє вищу стабільність і нижчу ймовірність деградації сигналу в порівнянні з GPON, що робить його більш придатним для сільських регіонів із великими міжвузловими відстанями.

Окремої уваги потребує аналіз потенційного впровадження технології у контексті аграрної цифровізації. Оскільки сільські території є середовищем, де інтенсивно розвиваються системи аграрної аналітики, моніторингу полів, автоматизації фермерських господарств та IoT-платформи для відстеження техніки, потреба у високошвидкісному передачі телеметричних даних невпинно зростає. У цьому середовищі XG-PON має значну перевагу над GPON, оскільки забезпечує більшу ємність для одночасної роботи широкого спектра пристроїв із різними профілями трафіку, зберігаючи низькі затримки та стабільність каналу.

Важливо також враховувати соціальний аспект розвитку інфраструктури. Сучасні цифрові послуги, такі як телемедицина, дистанційна освіта, електронне врядування та онлайн-банкінг, надають можливість сільським громадам долати бар’єри, пов’язані із географічною віддаленістю. Проте ефективність цих сервісів напряму залежить від здатності мережі забезпечити стабільний і прогнозований рівень якості передачі даних. Технологія XG-PON, завдяки своїй архітектурній гнучкості та високій пропускній здатності, створює фундамент для розгортання цифрових платформ, критично важливих для соціально-економічного розвитку сільських регіонів.

Одним із ключових аспектів, який суттєво впливає на ефективність розгортання широкосмугових мереж у сільських регіонах, є співвідношення між

капітальними витратами на побудову оптичної інфраструктури та потенційною кількістю абонентів, здатних забезпечити економічну доцільність такого інвестиційного проєкту. У цьому контексті надзвичайно важливо враховувати, що у сільській місцевості щільність населення часто є не просто нижчою, ніж у міських агломераціях, а може відрізнятися в десятки разів, що формує принципово інші вимоги до архітектури оптичної мережі та характеру капітальних вкладень у її розгортання. Економічне моделювання демонструє, що вартість підключення одного абонента при щільності забудови нижче 20–30 домогосподарств на квадратний кілометр може зростати нелінійно, оскільки значна частина інфраструктурних витрат припадає на магістральні ділянки, які не компенсуються масштабом абонентської бази.

З огляду на ці чинники виникає потреба в детальній оцінці потенційної структури навантаження, що формується у реальних умовах функціонування сільських спільнот. Унікальні соціально-поведінкові характеристики мешканців таких територій формують специфічні моделі споживання трафіку: пік навантаження, як правило, зміщується у вечірні години, коли домогосподарства активно використовують потокові мультимедійні платформи, засоби відеокомунікації та інтерактивні сервіси, тоді як у денний час навантаження переважно пов’язане з обмеженим набором цифрових сервісів. Такий характер споживання можна чітко простежити на графіку типового добового профілю мережевого трафіку на рисунку 1.7, де виражене пікове навантаження увечері вказує на необхідність резервування пропускної здатності, зокрема на рівні механізмів DBA у системах XG-PON, що забезпечує динамічний перерозподіл доступної смуги.

Крім того, значну увагу слід приділяти топологічним обмеженням, що визначають ефективність побудови оптичних мереж у конкретних типах сільських населених пунктів. У компактних селах із відносно рівномірною щільністю забудови оптимальним є застосування централізованих ODN-структур із відносно короткими магістральними ділянками та раціональним розподілом сплітерів, що знижує сумарну довжину волокон і мінімізує втрати в розгалуженнях. У лінійних

поселеннях, які формуються вздовж однієї основної дороги, виникає доцільність побудови послідовної або каскадної структури ODN, що хоча й збільшує кількість міжмуфтових з'єднань, однак забезпечує більшу гнучкість масштабування у разі майбутнього розширення мережі.

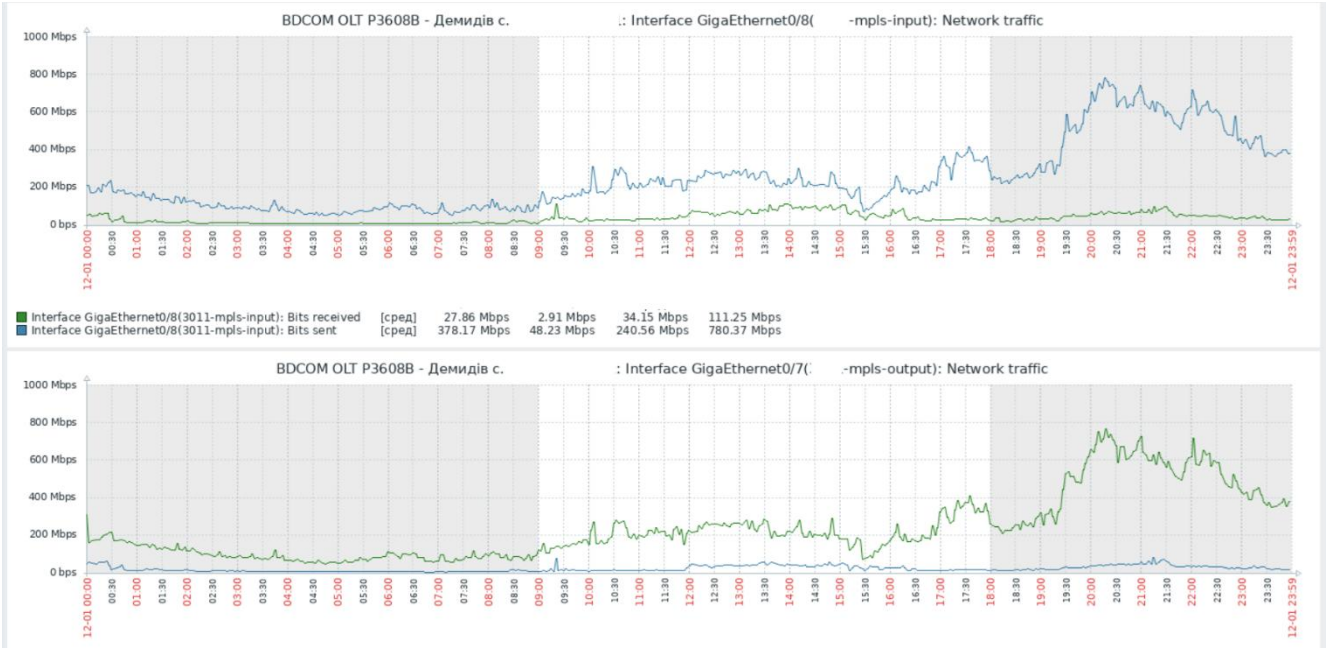


Рис. 1.7 Навантаження каналу передачі даних на uplink інтерфейсах OLT за 24 години

Набагато складнішою є ситуація у хутірних або розосереджених селах, де відстані між домогосподарствами можуть сягати сотень метрів або навіть кількох кілометрів, що формує суттєві виклики для оптичних технологій. Саме в таких випадках XG-PON має перевагу над GPON, оскільки більший оптичний бюджет дає змогу реалізувати протяжні лінії навіть у разі необхідності використання двох каскадів сплітерів. Проте у таких сценаріях економічна складова стає ключовою, адже значна довжина волокна та велика кількість підвісних ділянок формують високу вартість обслуговування, що повинно бути ретельно враховано при моделюванні окупності проєкту.

З урахуванням зазначених аспектів доцільно також аналізувати моделей організації доступу, які можуть застосовуватися у сільській місцевості з метою зниження вартості впровадження. Одним із перспективних напрямів є організація так званих «кластерних зон підключення», коли декілька домогосподарств

групуються навколо міні-вузла розподілу, що значно скорочує протяжність індивідуальних підвідних ділянок [10]. Така архітектурна концепція може забезпечити значне зниження витрат у лінійних та розгалужених селах, а також створити умови для подальшого розширення мережі без суттєвих структурних змін.

Особливе значення під час побудови сільських мереж має вибір методів прокладання оптичного кабелю. Підвісний спосіб, який у містах застосовується рідше через естетичні та нормативні обмеження, у сільській місцевості стає ключовим інструментом мінімізації капітальних витрат. Проте він створює додаткові вимоги щодо механічної стійкості кабелю, особливо у регіонах із сильними вітровими навантаженнями та значними сезонними коливаннями температур. Саме тому у проєктах, спрямованих на розгортання XG-PON у сільських умовах, часто застосовуються спеціалізовані самонесучі оптичні кабелі зі зниженим коефіцієнтом видовження та підвищеною опірністю ультрафіолетовому випромінюванню.

Нарешті, важливою складовою аналітичної оцінки можливості застосування XG-PON у сільській місцевості є прогнозування майбутніх потреб у пропускній здатності. Сучасні дослідження показують, що темпи зростання споживання трафіку у сільських регіонах часто навіть перевищують показники міських агломерацій, що пов’язано з активною цифровізацією аграрного сектору, появою інструментів точного землеробства, розвитком локальних відеоспостережних систем та впровадженням хмарних IoT-платформ. Таким чином, використання XG-PON у сільських регіонах є не лише технічно обґрунтованим, але й стратегічно важливим рішенням, яке формує основу для довгострокового розвитку цифрових сервісів.

2 ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ XG-PON

2.1 Основні елементи XG-PON

Технологія XG-PON, яка належить до сімейства систем PON другого покоління, представляє собою еволюційне вдосконалення архітектури GPON та спрямована на забезпечення істотно вищих параметрів пропускної здатності, стабільності та масштабованості при збереженні сумісності з наявною інфраструктурою ODN. З огляду на це архітектура XG-PON являє собою комплекс взаємопов'язаних функціональних модулів, кожен з яких формує окремий рівень роботи оптичної транспортної системи. До таких модулів відносять оптичний лінійний термінал OLT, оптичні мережеві термінали ONT/ONU, пасивну оптичну розподільчу мережу ODN, а також системну логіку протоколів, відповідальну за керування трафіком, кадрування, динамічний розподіл смуги, синхронізацію та контроль QoS.

Архітектурна роль та функціональна організація OLT. Оптичний лінійний термінал є центральним елементом мережі XG-PON, оскільки він виконує функції агрегації трафіку, керування оптичним ресурсом, динамічного виділення смуги DBA, а також взаємодії з магістральною мережею оператора. У фізичному шарі OLT характеризується передавальним модулем на довжині хвилі приблизно $\lambda_{TX} \approx 1577$ для низхідного напрямку та приймальним модулем на $\lambda_{RX} \approx 2070$ для висхідного напрямку. Передача даних у низхідному напрямку здійснюється за принципом широкомовного потоку, у той час як у висхідному напрямку реалізується сувора тимчасова мультиплексія, що підтримується системою DBA.

Робота OLT у XG-PON вимагає реалізації складного механізму формування кадрів XGTC, які за своєю структурою відрізняються від GPON-кадрів підвищеною щільністю та додатковими службовими полями. Точність синхронізації, що забезпечується вбудованими тактовими сигналами OLT, повинна відповідати вимогам ITU-T G.987, що гарантує мінімальні допуски на фазову деформацію та забезпечує стабільність мультиплексованих потоків [11].

Функціональні характеристики ONT та їхній вплив на ефективність мережі

ONT/ONU у структурі XG-PON виконують роль термінальних вузлів, які інтерпретують широкомовний низхідний потік та передають дані у висхідному напрямку на основі часових слотів, виділених механізмом DBA. Структура ONT передбачає наявність оптичного приймача, передавача, модуля квантування та відтворення кадрів XGTC, механізмів класифікації трафіку, а також системи OPCM.

Для ONT критично важливою є відповідність нормативним порогам чутливості приймача. У випадку downlink-каналу чутливість зазвичай перебуває в діапазоні яка представлена в формулі (2.1)

$$P_{RX.ONT} \in [-28, -30] dBm \quad (2.1)$$

тоді як вихідна потужність OLT представлена в формулі (2.2)

$$P_{TX,OLT} \approx +5 \ldots + 7\ dBm \quad (2.2)$$

Ці параметри прямо впливають на обчислення оптичного бюджету, яке виконується в підрозділі 2.2.

ONT також підтримує різні профілі QoS, що відповідають вимогам ITU-T G.987.3. До них належать жорсткі профілі для сервісів VoIP або IPTV та гнучкі профілі для послуг інтернет-доступу. Це обумовлює потребу в точній роботі механізмів пріоритезації та формування трафіку.

Опис та характеристики оптичної розподільчої мережі ODN. ODN є фізичною опорною інфраструктурою мережі XG-PON, яка включає магістральні ділянки оптичного кабелю, розгалужувальні муфти, сплітери, кросові панелі та абонентські відгалуження. Структура ODN у XG-PON зберігає сумісність із GPON, що дозволяє проводити модернізацію шляхом заміни активного обладнання без реконструкції всієї пасивної мережі. Узагальнена схема ODN представлена на рисунку 2.1

Основним параметром ODN є загальний оптичний бюджет, який визначає максимально допустиму довжину оптичної лінії та кількість можливих розгалужень. У базовій моделі XG-PON він становить:

$$B_{XG-PON} = 29\ dB\ (\text{клас } N1)$$

$$B_{XG-PON} = 31\ dB\ (\text{клас}\ N2)$$

Типові втрати в ODN включають:

Втрати у волокні:

$$A_{fiber} = 0.35\frac{dB}{km}\ \text{при}\ (1310\ \text{нм})$$

$$A_{fiber} = 0.25\frac{dB}{km}\ \text{при}\ (1550 - 1577\ \text{нм})$$

Втрати на сплайсах:

$$A_{splice} \approx 0.05 \ldots 0.1\ dB$$

Втрати на роз'ємах:

$$A_{connector} \approx 0.2 \ldots 0.5\ dB$$

Втрати на сплітерах:

$$A_{split}(1{:}32) \approx 17dB, \qquad A_{split}(1{:}64) \approx 20\ dB$$

Усі ці елементи формують обчислення оптичного бюджету, які подано у підрозділі 2.2.

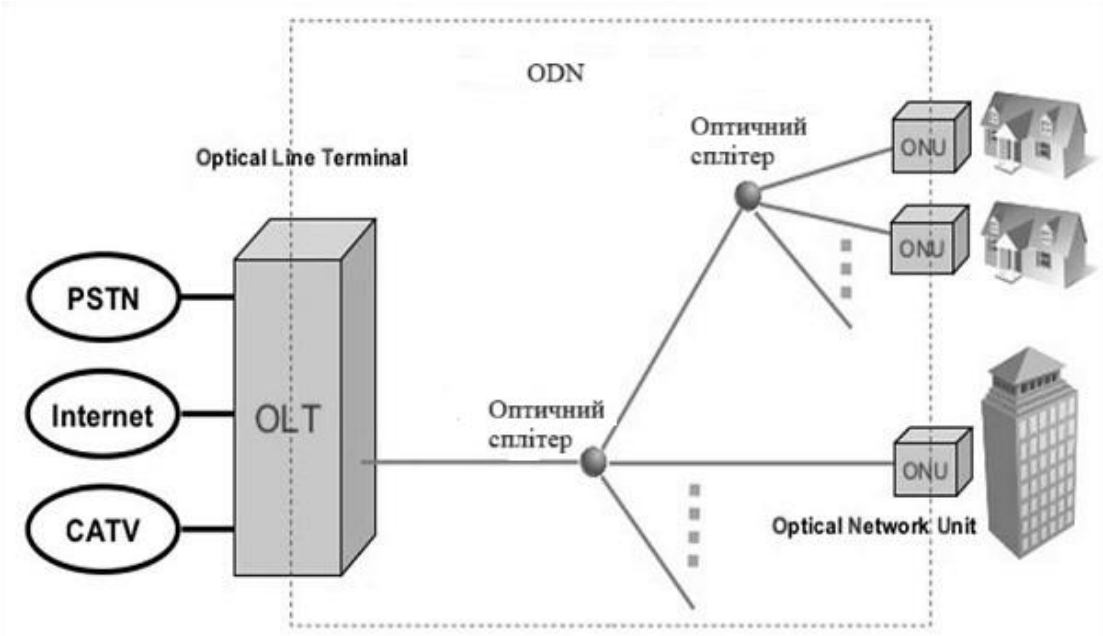


Рис. 2.1 Структура ODN у XG-PON

Кадрування, протокольна організація та взаємодія елементів - Передача даних у XG-PON реалізується через XGTC-кадри, які складаються з декількох

функціональних сегментів, у тому числі полів ідентифікації ONU, службових індикаторів, контрольних сум і корисного навантаження GEM-кадрів [12] [13].

Функціональна взаємодія OLT, ONT і ODN визначається протоколами рівня передачі:

1. механізмом Dynamic Bandwidth Allocation DBA, що працює за моделлю реального часу,
2. алгоритмами Forward Error Correction FEC,
3. застосуванням криптографічної схеми AES-128,
4. функціями OMCI для конфігурації та моніторингу ONT.

Рівень кадрування в XG-PON характеризується високою ефективністю завдяки мінімальній службовій надбудові, а також можливістю класифікації трафіку за типами GEM-потоків. Сукупність цих механізмів забезпечує пропорційний розподіл ресурсів, мінімізує затримки та збільшує стабільність у мережах з високими навантаженнями.

Порівняльні технічні характеристики основних елементів для забезпечення більш глибокого аналізу доцільно представити узагальнену таблицю характеристик ключових компонентів XG-PON. Основні числові характеристики елементів наведено в таблиці 2.1

Окрему роль у забезпеченні ефективної роботи XG-PON відіграють механізми динамічного розподілу пропускної здатності, що реалізуються на рівні Transmission Convergence. Завдяки використанню контейнерів T-CONT різних типів система здатна враховувати вимоги сервісів до затримки, джитера та гарантованої смуги пропускання, що є особливо важливим для чутливих до якості послуг, зокрема VoIP та потокового відео. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання ресурсів оптичного середовища та підвищити загальну продуктивність мережі доступу.

Крім того, архітектура XG-PON передбачає чітке розмежування функцій між оптичним лінійним терміналом та абонентськими оптичними мережевими терміналами, що спрощує централізоване керування мережею та її моніторинг. Реалізація механізмів автентифікації, шифрування та контролю доступу на рівні

кадрування підвищує рівень інформаційної безпеки та захисту переданих даних. У сукупності це забезпечує стабільну роботу мережі в умовах зростаючої кількості абонентів і різноманіття сервісів, а також створює передумови для подальшої еволюції пасивних оптичних мереж.

Табриця 2.1

Порівняльні параметри елементів мережі XG-PON

Параметр	OLT	ONT	ODN
Довжина хвилі TX/RX	1577/1270 нм	1270/1577 нм	-
Вихідна потужність	+5…+7 dBm	0…+2 dBm	-
Чутливість приймача	-	−28…−30 dBm	-
Макс. розгалуження	-	-	1:32 / 1:64
Типові втрати	-	-	волокно - 0.25 dB/км; роз'єм - 0.2 dB; сплайс - 0.1 dB
Підтримка QoS	повна (DBA, приорит.)	часткова (клієнтська)	-

Синхронізація та керування трафіком однією з ключових відмінностей XG-PON є вдосконалений механізм синхронізації ONT, що ґрунтується на суворій фазовій прив'язці тимчасових інтервалів, сформованих OLT. Для коректної роботи ONT повинно забезпечити виконання умови яка представлена у формулі (2.3)

$$T_{guard} > T_{Jitter} + T_{drift} \quad (2.3)$$

Де T_{guard} - охоронний інтервал, T_{Jitter} - флуктуації тактових імпульсів, T_{drift} - накопичення часової похибки у волокні залежно від температурного градієнта.

Завдяки поєднанню цих механізмів XG-PON забезпечує якіснішу часову стабілізацію порівняно з GPON, що особливо важливо в умовах густого трафіку та великої кількості абонентів.

У процесі проєктування мережі доступу на основі технології XG-PON надзвичайно важливим є етап формування її структурної та функціональної схеми, що передбачає узгоджене визначення місця встановлення центрального обладнання, логіку розташування проміжних вузлів розподілу, а також вибір і просторове закріплення абонентських терміналів, які забезпечують доступ кінцевих користувачів до оптичної інфраструктури [14]. Оскільки XG-PON є системою з пасивною оптичною мережею, її архітектурне формування вимагає особливої уваги до топологічної організації оптичного розподільного середовища, забезпечення відповідного рівня оптичного бюджету, керування співвідношенням розгалуження та оцінки прийнятної дальності передачі з урахуванням особливостей конкретного регіону розгортання.

У типовій структурі мережі XG-PON центральним елементом є оптичний лінійний термінал OLT, що розміщується у вузловому центрі провайдера — як правило, у центральному вузлі населеного пункту або у найближчому опорному бранч-центрі. Вибір конкретної будівлі або приміщення для розташування OLT потребує ретельного техніко-економічного обґрунтування. Зокрема, для стабільної роботи обладнання необхідно забезпечити відповідні умови електроживлення з обов’язковими системами резервування, підтримання температурного режиму, організацію надійного підключення до транспортної мережі оператора та можливість подальшого масштабування ресурсів при зростанні кількості абонентів. На цьому етапі надзвичайно важливо не лише визначити фізичне місце встановлення шасі OLT, а й спрогнозувати структуру його заповнення платами GPON/XG-PON, враховуючи можливість майбутніх модернізацій до XGS-PON або NG-PON2. Вигляд XG-PON OLT представлено на рисунку 2.2

Від оптичного лінійного термінала сигнал передається через пасивну розподільчу оптичну мережу, що включає магістральні та розподільчі волоконно-оптичні лінії, а також каскад оптичних сплітерів різних рівнів. Така топологія дозволяє ефективно організувати підключення значної кількості абонентських оптичних мережевих терміналів ONU/ONT без використання активного обладнання на проміжних ділянках тракту. Застосування пасивних компонентів

знижує експлуатаційні витрати, підвищує надійність мережі та спрощує її обслуговування, що є особливо актуальним для розгортання XG-PON у малонаселених або територіально розосереджених районах.

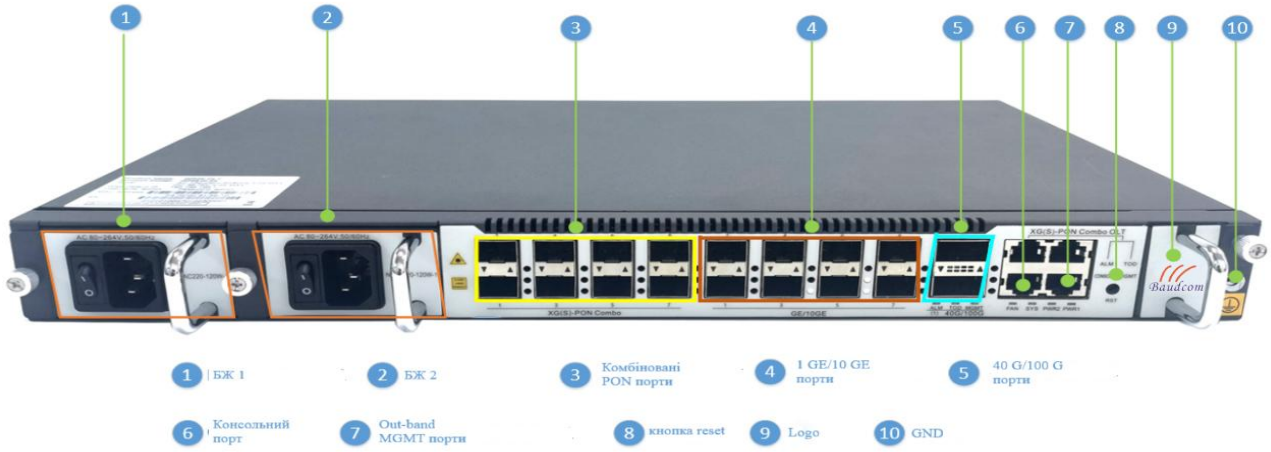


Рис. 2.2 Вигляд XG-PON OLT

Особливе значення має визначення радіуса обслуговування кожного PON-порту OLT. Через обмеження оптичного бюджету, характерного для стандарту XG-PON, максимальна довжина лінії передачі з урахуванням сумарних втрат у сплітерах, з'єднувачах і зварках зазвичай не перевищує 20–30 км, хоча у практичних схемах у сільській місцевості реальні значення здебільшого коливаються в межах 8–15 км. Цей показник суттєво впливає на розподіл абонентської бази між різними PON-портами, формування територіальної зональності, визначення потреби в проміжних розподільчих шафах та проектування топології оптичного кабелю [15].

Після визначення місця встановлення OLT формується загальна схема оптичного розподільного вузла, яка включає оптичні кроси, панелі для організації підключень та зондувальні точки для подальшої діагностики мережі. У контексті XG-PON важливо забезпечити мінімізацію кількості фізичних з'єднань у зоні OLT, оскільки кожне додаткове підключення супроводжується певними втратами оптичної потужності. Тому часто застосовують високощільні ODF-шафи з попередньо встановленими крос-модулями, які дають змогу зменшити кількість адаптерів та конекторних стиків.

Особливу увагу слід приділити вибору типу пасивного обладнання для ODN — оптичних розподільних мереж, що формують основний просторовий каркас системи XG-PON. Вибір сплітерів, коробок розподілу, розподільчих шаф і муфт безпосередньо впливає не лише на оптичний бюджет, а й на загальний рівень надійності та експлуатаційної стабільності мережі. При формуванні структури ODN зазвичай використовують два підходи: централізовану схему розгалуження, коли головний сплітер високого рівня 1:16 або 1:32 розміщується біля вузла OLT, або каскадну архітектуру з двома рівнями розгалуження наприклад, 1:4 + 1:8, що дає змогу значно оптимізувати використання оптичного кабелю. У сільській місцевості перевага часто надається каскадному підходу, оскільки він дозволяє зменшити довжину підвідних кабелів і забезпечити більшу гнучкість при підключенні абонентів, які розташовані територіально розосереджено. Зображення сплітера 1:8 зображено на рисунку 2.3

Розміщення сплітерів у полі відіграє ключову роль на етапі формування функціональної схеми XG-PON. Необхідно знайти баланс між віддаленістю сплітера від OLT та відстанню до абонентів, щоб мінімізувати загальні втрати. Сплітери першого рівня зазвичай встановлюються у магістральних оптичних муфтах або у вуличних шафах, тоді як другорядні сплітери, які виконують роль кінцевих точок розгалуження, розташовуються ближче до абонентів, часто — у розподільчих коробках на опорах або фасадах будівель.



Рис. 2.3 Вигляд сплітера на 1:8 для оптоволоконної мережі.

Абонентське обладнання — ONU або ONT — також потребує правильного вибору залежно від сценарію застосування. У сільських районах часто використовують моделі з підвищеною стійкістю до перепадів температури та вологості, особливо якщо передбачається монтаж обладнання у підсобних приміщеннях, неопалюваних будівлях або на зовнішніх стінах. Важливо також враховувати рівень підтримки функціональності, такої як Wi-Fi 6, можливість підключення IPTV, підтримка VoIP та необхідна кількість LAN-портів. У випадку аграрних об’єктів іноді застосовуються спеціалізовані ONU з вбудованим захистом від перенапруг та стабілізаторами живлення. Зображення ONU термнілу представлено на рисунку 2.4.

Обґрунтування вибору активного та пасивного обладнання ґрунтується на комплексному аналізі потреб мережі, прогнозованого навантаження, майбутньої масштабованості та економічної ефективності. При виборі OLT-обладнання визначальним чинником є можливість гібридного використання GPON, XG-PON та XGS-PON на одному шасі без заміни всієї платформи, що істотно знижує витрати на подальшу модернізацію. Для сільських мереж особливо важливою є підтримка довгих ліній, адаптивного регулювання потужності та розширених діагностичних функцій, таких як автоматична ідентифікація оптичних аварійних зон за допомогою вбудованих OTDR-модулів.



Рис. 2.4 Вигляд абонентського терміналу для оптоволоконної мережі.

Вибір сплітерів також потребує окремого технічного обґрунтування. Для мереж XG-PON зазвичай використовують моделі із зниженою поляризаційно-залежною втратою, стабілізовані від температурних коливань та сертифіковані відповідно до міжнародних стандартів GR-1209 і GR-1221. При значних територіальних охопленнях і змінних кліматичних умовах критично важливим є використання герметичних корпусів, здатних забезпечити стабільність параметрів протягом тривалого періоду експлуатації.

Сформована структурна та функціональна схема XG-PON дозволяє забезпечити максимально раціональне розміщення кабельної інфраструктури, оптимізувати довжину оптичних ліній, забезпечити відповідний рівень оптичного бюджету та досягнути високих експлуатаційних показників мережі. На наступних етапах проєктування ця схема служитиме основою для розрахунку пропускної здатності, планування трас оптичного кабелю, визначення параметрів оптичного бюджету та формування остаточної документації для будівельно-монтажних робіт.

У межах підрозділу було здійснено комплексний аналіз структурних та функціональних складових мережі доступу, побудованої за технологією XG-PON, із детальним розкриттям принципів формування її архітектури та логіки взаємодії ключових елементів, що визначають технічні, експлуатаційні та масштабувальні характеристики оптичної інфраструктури. Особлива увага була приділена обґрунтуванню місця встановлення оптичного лінійного термінала, який виконує роль центральної керуючої ланки всієї системи, забезпечуючи транспорт сигналів, адміністрування абонентських підключень і підтримку протоколів фізичного та канального рівнів. Показано, що вибір локалізації OLT має ґрунтуватися не лише на географічних чинниках, а й на енергетичних, кліматичних, телекомунікаційних та експлуатаційних параметрах, що в сукупності визначають стабільність та відмовостійкість мережі.

Розгорнуто описано принципи формування оптичної розподільної мережі, включно з аналізом каскадних та централізованих схем розгалуження, їх вплив на загальний оптичний бюджет, допустиму довжину лінії та рівень сигналу на приймальному обладнанні. Доведено, що правильна організація ODN уможливлює

досягнення оптимального співвідношення між довжиною кабельних ділянок, кількістю розподільчих вузлів та рівнем втрат у пасивних компонентах, що безпосередньо формує якість передавання інформації та дозволяє впроваджувати масштабовані сільські та міські архітектури.

Розглянуто питання вибору пасивного оптичного обладнання, акцентуючи на технічних параметрах сплітерів, муфт і розподільчих шаф, включно з їх температурною стабільністю, механічною надійністю та відповідністю міжнародним стандартам. Показано, що від коректності підбору таких компонентів залежить не лише загальний рівень втрат, а й довгострокова експлуатаційна придатність мережі, особливо у випадках її розгортання в районах із складними кліматичними умовами або розосередженою забудовою.

Окремо акцентовано на принципах визначення параметрів абонентських терміналів ONU/ONT, які повинні відповідати специфіці очікуваних сервісів, структурі трафіку та умовам встановлення. Підкреслено, що сучасні ONU є невід’ємним елементом загальної системної архітектури, а їх вибір впливає як на якість передавання даних, так і на можливість подальшого впровадження нових послуг.

Таким чином, у підрозділі було сформовано цілісне уявлення про архітектурну будову, функціональну логіку та конструктивно-технічні особливості XG-PON-мережі, що визначають її здатність забезпечувати високошвидкісний доступ у різних типах населених пунктів. Узагальнення отриманих результатів створює теоретичне підґрунтя для подальшого виконання формальних інженерних розрахунків пропускної здатності, побудови оптичного бюджету та проведення топологічного моделювання, які становитимуть зміст наступних підрозділів проєктної частини.

Отримані висновки дозволяють обґрунтовано підійти до вибору параметрів обладнання та структурних елементів мережі з урахуванням реальних умов експлуатації. Це, у свою чергу, забезпечує коректність проєктних рішень та їх відповідність сучасним вимогам до надійності й якості телекомунікаційних послуг.

Системний підхід до аналізу архітектури XG-PON сприяє підвищенню ефективності подальшого етапу проєктування.

2.2 Розрахунок пропускної здатності мережі та оптичного бюджету лінії передачі XG-PON

Процес проєктування мережі доступу на основі технології XG-PON неможливо відокремити від комплексного розрахунку пропускної здатності та оптичного бюджету, оскільки саме ці параметри визначають верхню межу масштабованості системи, допустиму довжину оптичної лінії, можливий рівень розгалуження та надійність експлуатації. Оскільки пасивні оптичні мережі не мають активних підсилювальних елементів, фізичний рівень стає критичним чинником, а розрахунки мають виконуватися з точністю до десятих часток децибела [16] [17].

В умовах сільської місцевості, де характерною є значна протяжність волоконно-оптичних ліній, використання XG-PON вимагає ретельного моделювання втрат та доступної пропускної здатності у середовищі зі змінними топографічними, кліматичними та демографічними чинниками. Саме тому даний підрозділ містить деталізований теоретичний та практичний аналіз, що охоплює математичні моделі трафіку, розподіл пропускної здатності між абонентами, порівняння бюджетів GPON і XG-PON, а також розширене пояснення механізмів затухання у волокні.

Пропускна здатність XG-PON та особливості її розподілу. Пропускна здатність мережі XG-PON визначається не лише номінальними характеристиками фізичного стандарту, але й архітектурою ODN, кількістю абонентів, моделлю трафіку та критеріями гарантування якості передачі даних. При цьому XG-PON підтримує асиметричну схему 10 Гбіт/с у низхідному та 2.5 Гбіт/с у висхідному напрямках, що значно перевищує можливості GPON. Номінальні швидкості технологій XG-PON та GPON пердставлено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Номінальні швидкості технологій XG-PON та GPON

Технологія	Швидкість у висхідному напрямку (Upstream)	Швидкість у низхідному напрямку (Downstream)
GPON	1.25 Гбіт/с	2.5 Гбіт/с
XG-PON	2.5 Гбіт/с	10 Гбіт/с
XGS-PON	10 Гбіт/с	10 Гбіт/с

Фізичне навантаження у PON розподіляється відповідно до мультиплексування за часом TDM, а тому фактична пропускна здатність абонента є функцією кількості користувачів у розгалуженні та коефіцієнта одночасного доступу, представлено у формулі (2.4)

$$C_{eff} = \frac{C_{PON}}{N * k_{sim}} \quad (2.4)$$

Де: C_{eff} — ефективна пропускна здатність одного абонента;

C_{PON}— сумарна пропускна здатність каналу;

N — кількість ONU, підключених до одного PON-сегмента;

k_{sim} - коефіцієнт одночасності.

У сільських мережах статистичні дослідження показують нижчі пікові навантаження, ніж у міських. Зокрема, середній добовий профіль використання мережі демонструє нерегулярні піки, що корелюють із соціально-побутовою активністю населення, але рідше сягають порогу насичення [18]. Це дозволяє застосовувати нижчий $k_{sim} \approx 0.25 - 0.30$, що збільшує ефективний бітрейт на абонента.

Порівняння пропускної здатності GPON та XG-PON

Для GPON:

$$C_{GPON(ONU)} = \frac{2.5\ \text{Гбіт/с}}{32 * 0.30} \approx 0.26\ \text{Гбіт/с}$$

Для XG-PON:

$$C_{XG-PON(ONU)} = \frac{10\ \text{Гбіт/с}}{32 * 0.30} \approx 1.04\ \text{Гбіт/с}$$

Таким чином, XG-PON забезпечує приблизно чотирикратний запас ефективної пропускної здатності, що є критичним у сценаріях, де абонентська база буде розширюватися або планується інтеграція послуг IPTV 4K, IoT-платформ, відеоспостереження чи віддаленого моніторингу аграрних систем поширених у сільській місцевості.

Оптичний бюджет визначає межі технологічної життєздатності мережі. У контексті XG-PON він повинен враховувати:

1. втрати у волокні;
2. втрати на конекторах;
3. втрати на механічних та зварних з'єднаннях;
4. втрати на пасивних оптичних розгалужувачах;
5. втрати на мікро- та макрозігинах;
6. технологічний резерв на деградацію оптичного волокна.

Загальна формальна модель представлена у формулі (2.5)

$$L_{total} = L_{fiber} + L_{splice} + L_{connector} + L_{split} + L_{reserve} \quad (2.5)$$

Втрати у волокні які залежність від довжини представлені у формулі (2.6)

$$L_{fiber} = \alpha_{\lambda} * d \quad (2.6)$$

де: a_{λ} - коефіцієнт затухання для XG-PON використовується λ = 1577 нм,
d - довжина волокна.

Типові значення в межах:

$$\alpha_{1577} = 0.29 - 0.33 \text{ дБ/км}$$

що менше, ніж у GPON 1310/1490 нм, де затухання сягає 0.35 дБ/км.

Порівняння оптичного бюджету GPON і XG-PON Оскільки XG-PON працює на іншій довжині хвилі, структура втрат відрізняється. Для GPON бюджет класу B+ B_{GPON} = 28 дБ, для XG-PON бюджет для PR30 $B_{XG\text{-}PON}$=31-33 дБ.

Розглянемо характер зміни втрат у функції довжини лінії які представлені у формулі (2.7) та (2.8)

$$L_{fiber(GPON)} = 0.35 * d \quad (2.7)$$

$$L_{fiber(XG-PON)} = 0.30 * d \quad (2.8)$$

Для типової довжини 20 км:

$$L_{fiber(GPON)} = 0.35 * 20 = 7.0 \text{ дБ}$$

$$L_{fiber(XG-PON)} = 0.30 * 20 = 6.0 \text{ дБ}$$

За однакової структури ODN XG-PON отримує додатковий запас приблизно 1 дБ лише за рахунок довжини хвилі.

Розрахункові моделі сплітерів та їх вплив. Пасивні розгалужувачі створюють найбільший внесок у загальні втрати.Їх характеристика описується формулою (2.9)

$$\mathrm{L}_{split} = 10\log_2(N) + L_{techn} \quad (2.9)$$

де: N - коефіцієнт розгалуження;

L_{techn} - технологічні втрати приблизно 0.6–1.3 дБ.

Для прикладу розрахуємо втрати для сплітера 1:32 що є стандартним.

$$\mathrm{L}_{split} = 10\log_2(32) + 1.0 = 15 + 1.0 = 16 \text{ дБ}$$

Порівняння GPON і XG-PON демонструє, що обидві технології мають однакові втрати на сплітерах, однак XG-PON має більший бюджет, що дозволяє:

1. збільшувати довжину лінії;
2. або додавати другий каскад розгалуження;
3. або зберігати більший технологічний резерв.

Фактори деградації та їх формалізований вплив. Окрім обчислюваних втрат, необхідно включати резерв на деградацію волокна з часом. Щорічне збільшення втрат становить $\Delta L_{year} \approx 0.002 - 0.005$ дБ/км, а за 15 років приблизно $\Delta L_{15} \approx 0.03 - 0.08$ дБ/км.

Також фактором деградації являються макрозігини і описуються формолую (2.10)

$$L_{bend} = k_{bend} * n \quad (2.10)$$

де: k_{bend}- коефіцієнт затухання при макрозігинах, n - кількість критичних згинів.

Наступним фактором є мікрозігини в кабелях зі щільним буфером, які описуються формолую (2.11)

$$L_{micro} \approx f(\Delta T, \Delta P) \quad (2.11)$$

де втрати є функцією температурних та механічних факторів. У реальних мережах вводять резерв 3–5 дБ, що забезпечує надійність на весь життєвий цикл мережі.

У загальному вигляді пропускна здатність однієї групи абонентів визначається співвідношенням яка представлена в формулі (2.12)

$$C_{ONU} = \frac{C_{PON}}{N * k_{sim}} \quad (2.12)$$

де : C_{ONU} - агрегаційна швидкість PON-сегмента;

N - ількість абонентів у сплітері;

k_{sim} - коефіцієнт одночасності використання ресурсу

Для сільської місцевості, де одночасність є нижчою через нерівномірність добової активності, значення k_{sim} зазвичай коливається в межах:

$$k_{sim} = 0.2 - 0.35$$

Наприклад, для розгалуження 1:32**:**

$$C_{ONU} = \frac{\left(10 \frac{\text{Гбіт}}{c}\right)}{32 * 0.35}$$

що суттєво перевищує середньостатистичні потреби побутового користувача.

Таким чином, у типовій сільській структурі XG-PON забезпечує значний запас пропускної здатності навіть у випадках пікових навантажень.

Розрахунок оптичного бюджету XG-PON. Оптичний бюджет – це максимальна величина втрат в оптичній лінії, яку допускає система для коректної роботи обладнання.

Він визначається співвідношенням яке вказано у формулі (2.13)

$$B_{opt} = P_{TX} - P_{RX} \quad (2.13)$$

де : P_{TX} вихідна потужність передавача OLT; P_{RX} мінімальна чутливість приймача ONU

Для XG-PON стандарт ITU-T G.987 визначає три профілі бюджету:

1. PR10 – до 29 дБ
2. PR20 – до 31 дБ
3. PR30/PR40 – до 33–35 дБ

У більшості інфраструктур використовується профіль PR30, який дозволяє будувати лінії з великими довжинами та глибокими каскадами розгалуження.

Структура втрат у лінії XG-PON - Загальні втрати в системі визначаються сумою втрат усіх компонентів яка представлена у формулі (2.14)

$$L_{total} = L_{fiber} + L_{splice} + L_{connector} + L_{split} + L_{reserve} \quad (2.14)$$

Втрати у волокні. Затухання визначається формулою (2.15)

$$L_{fiber} = \alpha * d \quad (2.15)$$

де : a - питомі втрати (0.32–0.36 дБ/км для довжини хвилі 1310 нм), d - довжина лінії (км).

Втрати на з'єднаннях і зварках визначаються за формулами (2.16) та (2.17).

$$L_{splise} = n_{sp} * a_{sp} \quad (2.16)$$

$$L_{connector} = n_{conn} * a_{conn} \quad (2.17)$$

Втрати на сплітерах. Приклад втрат на сплітерах представлено у формулі (2.18)

$$L_{split} = 15.5 * 17.2 \text{ дБ} \quad (2.18)$$

Ці значення включають внутрішні технологічні втрати.

У контексті проведених розрахунків важливо підкреслити, що оцінка пропускної здатності та оптичного бюджету мережі XG-PON не є статичною величиною — вона формується під впливом сукупності технологічних, фізичних та експлуатаційних факторів. Реальні умови експлуатації мережі завжди вносять корективи у проєктні значення, що особливо помітно при значних довжинах оптичних ліній або підвищеній щільності абонентського підключення. Саме тому оптичний бюджет необхідно розглядати як інтегральний показник, що визначає не лише можливість гарантованої передачі сигналу, а й стабільність функціонування мережі протягом усього життєвого циклу.

У практиці проєктування PON-мереж технологічні втрати є однією з найбільш критичних складових загальних втрат. Вони акумулюють у собі похибки монтажу, додаткові зварні з'єднання, запас на старіння та деградацію оптичного волокна, а також можливі непередбачені втрати, що виникають у процесі технічного обслуговування. Тому при інженерному розрахунку, особливо у

магістральних ділянках мережі доступу, доцільно використовувати більш консервативні значення технологічних втрат — у межах 0,8–1,3 дБ. Такий підхід дозволяє гарантувати, що навіть при максимальному навантаженні та несприятливих умовах зовнішнього середовища параметри мережі залишатимуться в межах допустимих норм [19].

Порівнюючи XG-PON із GPON, можна відзначити, що підвищення пропускної здатності у десять разів не супроводжується еквівалентним зростанням вимог до оптичного бюджету. Хоча XG-PON використовує модулювання зі значно вищою швидкістю передачі даних, чутливість приймачів та енергетичні параметри оптичних модулів у складі OLT і ONT були покращені відповідно до нових стандартів. Це дозволило перейти на нові швидкісні режими без суттєвого скорочення максимальної довжини ділянки абонентського доступу. На практиці це означає, що XG-PON може використовувати ту ж фізичну інфраструктуру, яка раніше застосовувалась у GPON, з мінімальними конструктивними змінами кабельної мережі.

Особливо важливим аспектом є залежність величини приймального оптичного сигналу від рівня мультиплексування абонентів. Значення коефіцієнта розгалуження спліттера суттєво впливає на величину втрат у системі, і хоча типовим значенням для XG-PON залишається дільник 1:32, у практиці інженерного проєктування дедалі частіше використовують комбінації каскадних розгалужень, наприклад 1:2 → 1:16 або 1:4 → 1:8. Це дає змогу оптимально розташувати оптичні розподільчі точки у просторі та забезпечити рівномірний розподіл навантаження між групами абонентів. У таких конфігураціях загальні втрати будуть дещо більшими, ніж у випадку одиночного спліттера, проте архітектура мережі при цьому отримує більшу гнучкість та масштабованість.

Розширене порівняння параметрів GPON і XG-PON підтверджує, що основний вплив на втрати в оптичному середовищі чинить не тип технології, а структура побудови мережі. У GPON типовий оптичний бюджет класу B+ становить близько 28 дБ, у той час як XG-PON класу N1 забезпечує близько 29 дБ, а класу N2 — до 31 дБ. Таким чином, мережа XG-PON володіє певним запасом,

який дозволяє компенсувати збільшення втрат на високошвидкісній передачі. Це особливо важливо при модернізації існуючих мереж, де старі кабельні лінії можуть мати підвищене загасання.

Ще одним чинником, що впливає на точність розрахунку оптичного бюджету, є середній коефіцієнт загасання волокна. Для типових одномодових волокон G.652.D він становить 0.32–0.35 дБ/км у діапазоні 1310 нм та близько 0.20–0.22 дБ/км у діапазоні 1550 нм. Оскільки XG-PON переважно використовує передавання в районі 1577 нм, загасання в середньому на 0.02–0.05 дБ/км вище, ніж у класичному GPON. Ця різниця сама по собі не є критичною, проте на великих відстанях вона накопичується та стає суттєвою. Тому в науково-технічній літературі часто рекомендується проводити нормування довжини ліній із певним запасом, що підвищує стійкість системи.

Також варто згадати, що розрахунок пропускної здатності мережі XG-PON не обмежується лише фізичними параметрами середовища. Значну роль відіграють протокольні механізми DBA, які визначають, як саме розподіляється доступний канал між абонентами в реальному часі. Цей механізм особливо важливий у мережах із високою щільністю користувачів, де навантаження може бути нерівномірним та динамічним. Ефективність роботи DBA впливає на практичну пропускну здатність мережі та на показники затримки, що мають пряме значення для сучасних сервісів, таких як відеоконференції, потокове мовлення високої чіткості та хмарні застосунки.

Узагальнюючи наведені положення, можна зазначити, що розрахунок пропускної здатності та оптичного бюджету у мережах XG-PON є комплексною задачею, яка потребує урахування широкого спектру технологічних і експлуатаційних параметрів. Правильний вибір коефіцієнтів, значень загасання та параметрів розгалуження має визначальний вплив на працездатність мережі. Розширений аналіз також показує, що XG-PON, завдяки оптимізованій архітектурі та покращеним технічним характеристикам обладнання, забезпечує стабільну роботу навіть у мережах із розвиненою структурою доступу та великою довжиною абонентських ліній.

Додатковим аспектом, який потребує окремої уваги в контексті розрахунку оптичного бюджету мережі XG-PON, є вплив температурних коливань на стабільність параметрів волоконно-оптичних ліній. Температурні зміни здатні спричиняти варіації коефіцієнта загасання, особливо в діапазоні довжин хвиль близьких до 1600 нм, де значення втрат стають чутливими до мікрозгинів, внутрішніх напружень кабелю та сезонних деформацій ґрунту або елементів інженерних конструкцій. Такі фактори можуть впливати на величину прийнятого сигналу, особливо на терміналах, що розташовані на межі допустимого рівня чутливості. Саме тому нормативні методики проєктування рекомендують закладати додатковий запас оптичного бюджету, який у практичних умовах становить 1,5–2 дБ понад мінімально необхідне значення. Такий запас дозволяє компенсувати довгострокову деградацію оптичних компонентів та забезпечує стабільність параметрів мережі протягом десятирічного циклу експлуатації.

У системах XG-PON важливим елементом є також аналіз спектральних характеристик передавального та приймального обладнання. Через використання діапазону 1577 нм для прямого каналу та 1270 нм для зворотного, на оптичну систему впливають різні джерела шумів, включно зі спонтанним випромінюванням у підсилювачах, нелінійними процесами у волокні та паразитними відбиттями на конекторах. Нелінійні ефекти, такі як самофазова модуляція та ефект Рамана, зазвичай не є критичними в мережах доступу через відносно низькі потужності передавання, проте при великих довжинах ліній та значних коефіцієнтах розгалуження вони можуть впливати на стабільність рівня сигналу. Такі явища вимагають від проєктувальника точнішого врахування значень реального загасання та використання високоякісних компонентів із низьким рівнем зворотних втрат.

Особливої уваги заслуговує питання впливу топологічних особливостей населеного пункту на параметри оптичного бюджету. Для компактних або щільно забудованих територій характерною є мінімальна довжина ліній та відносно незначні втрати на ділянках між OLT та кінцевими абонентами. Водночас у протяжних селах або селищах лінійного типу загальна довжина магістральних ділянок може перевищувати 15–18 км, що створює додаткові вимоги щодо

забезпечення стабільності сигналу та максимального зниження непотрібних втрат. У такому разі проєктувальник повинен оптимізувати структуру мережі, переміщуючи оптичні розподільчі пункти ближче до середніх зон абонентського навантаження або використовуючи розгалуження у два рівні для рівномірного розподілу втрат між ділянками.

У практиці порівняння GPON і XG-PON часто аналізують не лише їхні енергетичні характеристики, а й особливості службових механізмів формування кадрів, оскільки саме протокольні накладні витрати визначають реальну здатність мережі передавати користувацький трафік. У випадку GPON механізм GEM-фреймування забезпечує високу ефективність передачі для змішаних типів трафіку, проте при збільшені щільності абонентів у години пікового навантаження в мережі можуть виникати небажані затримки, викликані недостатньою гнучкістю динамічного розподілу ресурсу. У XG-PON ці недоліки були частково усунуті завдяки модернізованому механізму DBA, який забезпечує швидше реагування на зміну інтенсивності трафіку та знижує ймовірність перевищення доступної пропускної здатності [20]. Це важливо у контексті зростання популярності відеосервісів високої чіткості та інтерактивних застосунків, які формують нестабільні й сплескоподібні навантаження на мережу.

Ще однією ключовою характеристикою сучасних систем XG-PON є здатність забезпечувати якість обслуговування на рівні, необхідному для критично важливих сервісів, таких як телемедицина, електронні адміністративні послуги та платформи дистанційної освіти. Оцінка оптичного бюджету в цьому контексті розглядається як параметр, що визначає не лише фізичну можливість успішної передачі даних, а й стабільність затримки, відсутність значних флуктуацій рівня сигналу та здатність системи витримувати миттєве збільшення навантаження. Таким чином, коректно виконані розрахунки пропускної здатності стають підґрунтям для забезпечення передбачуваності мережевих характеристик та їх відповідності міжнародним стандартам.

Крім того, у процесі розроблення проєкту мережі XG-PON доцільно враховувати потенційні перспективи модернізації до ще вищих технологічних

рівнів, таких як XGS-PON або 25G-PON. У цьому контексті розрахунок оптичного бюджету повинен передбачати можливість інтеграції компонентів з підвищеними вимогами до спектральної чистоти сигналу та зниженої завадостійкості. Сучасні практики побудови мереж доступу передбачають застосування кабельної інфраструктури з надлишковою кількістю волокон, що створює технічні передумови для подальшого розширення мережі без суттєвих перебоїв у її роботі та без необхідності повної заміни фізичного середовища.

Також важливим завданням при розрахунку параметрів XG-PON є визначення допустимого рівня затухання каналу в умовах аварійних перемикань та резервування. Наприклад, при використанні резервної петлі або створенні двох альтернативних маршрутів у магістральному сегменті, кожен з яких може містити додаткові роз’єми та муфти, загальні втрати можуть збільшуватися на 3–4 дБ порівняно з основною конфігурацією. Такий підхід потребує ретельного аналізу, оскільки резервування підвищує надійність мережі, проте зменшує доступний оптичний бюджет. У системах XG-PON, де максимальні втрати лінії можуть досягати 31 дБ, такі резервні схеми залишаються можливими, але потребують більш консервативного підходу до вибору сплітерів і довжин окремих сегментів.

З огляду на викладене можна стверджувати, що процес розрахунку пропускної здатності та оптичного бюджету у системах XG-PON є багатоетапним, багатофакторним та вимагає всебічного аналізу особливостей майбутньої мережі. Порівняння з GPON дозволяє глибше зрозуміти механізми впливу довжини ліній, коефіцієнта розгалуження, технологічних втрат та спектральних характеристик на кінцеву якість надання послуг. Виконані розрахунки формують основу інженерних рішень, які будуть визначати надійність, масштабованість та економічну ефективність телекомунікаційної інфраструктури протягом тривалого періоду експлуатації. Врахування зазначених параметрів на етапі проєктування дозволяє мінімізувати ризики перевантаження мережі та деградації якості сервісів у процесі її розвитку [21] [22]. Це забезпечує оптимальне співвідношення між технічними можливостями системи та реальними потребами абонентів. У підсумку досягається

підвищення ефективності експлуатації мереж XG-PON у довгостроковій перспективі.

2.3 Топологічне проєктування та планування трас оптичного кабелю

Топологічне проєктування мережі доступу на основі технології XG-PON є одним із ключових етапів інженерного планування, оскільки саме від структури мережі, характеру її просторової організації, вибору типу топології та логіки розміщення оптичних елементів залежить як технічна ефективність роботи системи, так і економічна доцільність її розгортання у конкретних умовах місцевості. На відміну від попередніх поколінь доступових технологій, побудова пасивних оптичних мереж потребує значно точнішого врахування не лише протяжності ліній, а й рельєфних особливостей, конфігурації населених пунктів, структурної сегментації абонентського навантаження та потенційних перспектив розширення мережі протягом подальших років експлуатації. Для мереж XG-PON, які здатні забезпечувати гигабітні швидкості на кожного абонента, вимоги до правильності обраної топології є ще більш критичними, оскільки несумісність спліттерів, неправильне розташування вузлів розподілу або надмірне збільшення довжин окремих ділянок можуть призвести до невідповідності нормам оптичного бюджету та подальших обмежень у масштабуванні системи.

Вибір оптимальної топології мережі залежить від великої кількості факторів, серед яких провідне значення мають щільність абонентської забудови, структура населеного пункту, наявність існуючої кабельної інфраструктури, вимоги до резервування, економічна модель проєкту та очікуваний рівень модернізації мережі у майбутньому. Традиційно PON-мережі будуються за деревоподібною топологією, у якій центральне обладнання OLT у вузлі оператора з’єднується з абонентськими ONU через послідовність пасивних спліттерів, розгалужуючи єдине оптичне волокно на десятки та сотні абонентських ліній. Така структура є базовою та найпоширенішою, оскільки вона забезпечує оптимальне співвідношення вартості та технічної ефективності. Проте в окремих випадках доцільним може

бути застосування альтернативних топологій, зокрема шинної або кільцевої, які хоча й рідше використовуються в класичних PON-мережах, однак мають свої переваги в умовах специфічної географічної або технічної ситуації.

Деревоподібна топологія передбачає, що оптична магістраль від OLT розгалужується за допомогою розподільчих спліттерів на два рівні: первинні спліттери першого рівня формують магістральний розподіл потужності між окремими зонами обслуговування, тоді як вторинні спліттери забезпечують остаточний поділ сигналу до окремих груп абонентів. Така структура забезпечує високий рівень керованості мережі, дозволяє гнучко розподіляти абонентське навантаження та оптимізувати довжини ліній до окремих ONU. Перевага деревоподібної топології полягає у можливості максимального використання пасивних елементів, що знижує експлуатаційні витрати і мінімізує ймовірність відмов, оскільки кількість активних точок у польових умовах є мінімальною. Водночас така структура демонструє певні обмеження у випадках надмірної протяжності мережі або при необхідності побудови резервних шляхів, оскільки резервування у формі дублювання магістралі може суттєво збільшувати витрати.

Шинна топологія в контексті PON-мереж застосовується вкрай рідко, проте може бути корисною в умовах лінійно розташованих населених пунктів, де всі абоненти розташовані вздовж однієї дороги або вулиці. У такій структурі оптичний кабель прокладається вздовж основної транспортної осі, а відгалуження до абонентів виконуються через послідовно розташовані розподільчі муфти або спліттерні бокси. Цей підхід може бути економічно ефективним для сіл лінійного типу, однак він зазвичай погіршує керованість мережі та ускладнює балансування оптичного бюджету, особливо при великій кількості відгалужень [22] [23].

Кільцева топологія не є типовою для класичної архітектури PON, проте використовується у магістральних або міських транспортних сегментах, на які спирається мережа доступу. В окремих випадках кільцева структура може бути інтегрована до підсистеми розташування розподільчих вузлів, забезпечуючи резервування між вузлами першого рівня та створюючи можливість автоматичного перемикання світлових маршрутів у випадку пошкодження кабелю. Для мереж XG-

PON така структура є доцільною у великих населених пунктах, де надзвичайно високі вимоги до надійності та неперервності сервісу, особливо коли мережа використовується для обслуговування критичних інфраструктурних об’єктів.

Проєктування фізичного розміщення оптичних трас передбачає комплексний інженерний аналіз території, що включає вивчення рельєфу, дорожньої інфраструктури, стану існуючих кабельних каналів, наявності електроопор, технічних коридорів та можливості розміщення нових магістральних і розподільчих ліній. Одним з ключових етапів планування є визначення оптимального розташування спліттерів. Вони повинні бути встановлені таким чином, щоб сумарна довжина ліній була мінімальною, а загальні втрати відповідали вимогам оптичного бюджету. Зазвичай спліттери першого рівня розміщуються у центральних точках зон обслуговування, тоді як вторинні спліттери розташовуються поблизу середини групи абонентів. Це дозволяє забезпечити відносну симетрію довжин абонентських ліній та оптимізувати навантаження на мережу.

Інженерні рішення щодо вибору маршруту оптичних кабельних ліній залежать від способу прокладання кабелю: повітряного, підземного або комбінованого. Повітряний спосіб є економічно найбільш вигідним, однак він більш схильний до зовнішніх пошкоджень, впливу метеорологічних факторів та деградації через механічні коливання. Підземне прокладання є технічно оптимальним, оскільки забезпечує максимальний захист кабелю, однак воно є значно дорожчим та вимагає відповідних погоджень із комунальними службами. У сільських регіонах часто застосовується комбінований підхід, коли магістральні ділянки прокладаються підземним способом, а розподільчі або абонентські відгалуження — повітряним, що дозволяє зберегти баланс між вартістю, надійністю та швидкістю будівництва.

Вибір обладнання для проєктування топології XG-PON передбачає визначення типу OLT, класу оптичних модулів клас N1 або N2 для XG-PON, типу пасивних спліттерів, конструкції муфт, технічних параметрів ONU та сумісності всіх елементів з обраною архітектурою. Важливим аспектом є визначення класу

оптичних передавачів OLT, оскільки вони визначають допустимий оптичний бюджет і, відповідно, максимально можливу кількість спліттерів та довжину лінії. Наприклад, клас N2 дозволяє розгортати мережі з більшими відстанями та більшим рівнем розгалуження, однак він є дорожчим і потребує відповідного абонентського обладнання.

Під час формування структурної схеми мережі розглядаються варіанти використання одно або дворівневої системи розгалуження. Одноріневе розгалуження застосовується у компактних районах, де всі абоненти розташовані на невеликій території, і дозволяє забезпечити високий рівень рівномірності втрат. Дворівневе розгалуження дає змогу зменшити довжини ліній до абонентів у протяжних населених пунктах, однак потребує ретельнішого розрахунку загального оптичного бюджету. Структурна схема має бути побудована таким чином, щоб забезпечити як технічну ефективність, так і можливість подальшої модернізації мережі без заміни кабельної інфраструктури.

Топологічне проєктування мережі доступу XG-PON неможливе без урахування конкретної геопросторової структури населеного пункту, щільності забудови та конфігурації дорожньої інфраструктури. У випадку села Левківці, зображеного на карті яка зображена на рисунку 2.5, простежується характерна для Подільського регіону морфологічна структура розтягнутого лінійного населеного пункту, який формувався історично вздовж русла річки Сільниця та паралельної дорожньої артерії Т0212. Населений пункт не має щільної центрової забудови, а переважна більшість житлових будинків розташована ланцюгоподібно вздовж основних доріг і другорядних вулиць, що відгалужуються від них під різними кутами. Така просторово-планувальна організація передбачає суттєву протяжність магістральних ліній і мінімальну кількість компактних вузлів концентрації абонентів [24] [25].

Для подібного типу забудови топологія дерево є найбільш доцільною та технічно обґрунтованою. У класичній деревоподібній структурі оптичний сигнал від центрального вузла OLT передається однією магістральною лінією, на якій послідовно або ієрархічно розміщуються пасивні розгалужувальні компоненти.

Саме така архітектура відповідає конфігурації села Левківці, де переважають протяжні лінії вздовж дорожніх комунікацій, а відгалуження до окремих вулиць можуть бути реалізовані за рахунок локальних сплітерів у розподільчих шафах. Топологія дерево мінімізує довжину кабельних ліній, оптимізує використання оптичного волокна та забезпечує відносно рівномірний розподіл навантаження між абонентськими сегментами.

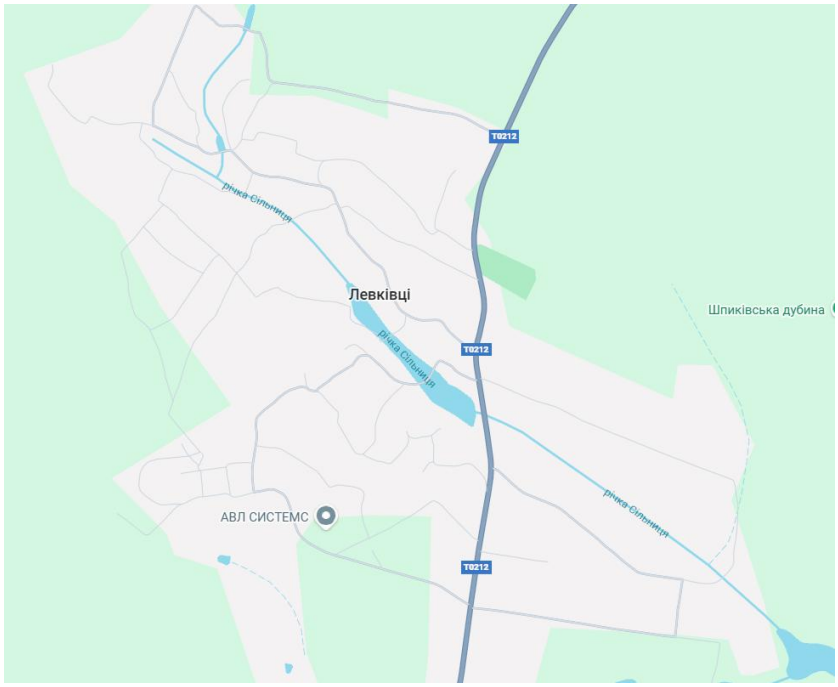


Рис. 2.5 Карта с. Левківці, де інфраструктура переважно знаходиться продовж основної дороги.

Використання топології шина для цього населеного пункту не є доцільним, оскільки шина передбачає послідовне підключення абонентів до одного лінійного тракту з обмеженими можливостями резервування та суттєвими складнощами при масштабуванні. У випадку Левківців це призвело б до нерівномірних втрат сигналу, до ускладнення ремонтних робіт та до необхідності прокладати надмірно протяжні кабелі з численними з’єднаннями. Топологія кільце також не знаходить свого конструктивного застосування в цьому випадку, адже село не має замкненого периметрального контуру доріг, який дозволив би сформувати кільцеву оптичну архітектуру. Крім того, кільцева топологія вимагає подвоєння довжини волокон та

додаткових активних взаємодій між відрізками мережі, що економічно невигідно для малонаселених територій.

Таким чином, архітектура дерево виявляється найбільш придатною для геопросторової конфігурації села Левківці. Вона забезпечує можливість ієрархічного розміщення оптичних сплітерів: один магістральний розподільчий сплітер логічно встановити поблизу центральної частини села, а додаткові — на відгалуженнях окремих районів. Центральна частина Левківців проходить уздовж річки Сільниця, і ця ділянка є найоптимальнішою з точки зору доступу технічного персоналу, близькості до магістральної дороги та можливості встановлення захищеної від зовнішніх впливів шафи розподілу [26] [27].

У межах проєктування вибір місця встановлення OLT має ґрунтуватися на параметрах доступності електроживлення, логістичної зручності та можливості підведення магістрального транспортного каналу від провайдера. Найбільш обґрунтованим рішенням є розташування OLT у найближчому вузлі доступу оператора, розташованому при в'їзді у населений пункт або в найближчому більшому населеному центрі, де присутні відповідні технічні приміщення. Передача транспортного сигналу до Левківців може здійснюватися волоконно-оптичним кабелем типу ОКЛ або ОКДП із захистом від механічних пошкоджень.

З огляду на характер забудови та дискретність розташування житлових будинків доцільним є використання кабельних ліній, прокладених уздовж основної дороги Т0212, як зображено на рисунку 2.6. Від неї формуються відгалуження до другорядних вулиць, що дає змогу зменшити загальну довжину кабельної інфраструктури. Кабелі слід прокладати переважно на опорах повітряної лінії, що значно здешевлює розгортання, особливо в умовах сільської місцевості. У місцях перетину річки або заболочених ділянок варто застосовувати підземну прокладку в захисних трубах ПНД, оскільки такі ділянки є найбільш вразливими до погодних впливів.

Для пасивної інфраструктури використовується оптичний кабель типу ОКНД або аналогічний, з кількістю волокон від 12 до 24 залежно від прогнозованої кількості абонентів у сегменті. Основний магістральний кабель рекомендовано

прокладати з запасом щонайменше 30 % волокон для майбутнього розширення мережі або модернізації до стандартів NG-PON2. Для розподільчих ділянок достатньо кабелів малого волокномісткості 4–8 волокон, що дозволяє зменшити витрати та підвищити гнучкість планування.



Рис. 2.6 Карта оптоволоконної інфраструктури, на якій червоним позначені оптичні сплітери, чорним — вузол OLT, а синім — траси ВОЛЗ.

Пасивні розподільчі елементи — сплітери 1×8, 1×16 та 1×32 — доцільно монтувати в герметичних муфтах, розташованих уздовж траси кабелю, причому їх кількість і місце встановлення повинні відповідати принципу рівномірного навантаження на PON-порт. Якщо село має протяжну лінійну структуру, як у випадку Левківців, найбільш раціонально розміщувати сплітери на відстані 400–700 метрів один від одного, залежно від щільності абонентів на конкретних вулицях.

Оптичні абонентські термінали ONT слід встановлювати всередині помешкань у місцях, захищених від конденсату та різких перепадів температур. Усі монтажні роботи повинні враховувати нормативні вимоги щодо радіуса згину кабелю, розрахунку механічного натягу та мінімізації кількості зварювань, адже

кожне з’єднання збільшує загальні втрати оптичного бюджету. Для XG-PON рекомендовано забезпечити запас потужності щонайменше 3 дБ на випадок сезонних коливань параметрів волокна або можливості подальшого каскадування сплітерів.

Таким чином, сукупність просторових, технічних та експлуатаційних характеристик села Левківці однозначно вказує на доцільність впровадження деревоподібної топології із магістральним проходженням лінії вздовж основної дороги та відгалуженням до периферійних вулиць. Вибір відповідного обладнання, оптимізація структури сплітерів та правильне планування трас прокладання кабелю забезпечують ефективність мережі, її стійкість, економічну доцільність та перспективність для подальшої модернізації.

Висновок до розділу 2 - у межах другого розділу було проведено комплексне технічне опрацювання питань, пов’язаних із проєктуванням мережі доступу на основі технології XG-PON, з урахуванням структурних, інженерних та експлуатаційних аспектів її побудови. На основі всебічного аналізу визначено, що XG-PON завдяки високій пропускній здатності, значному оптичному бюджету та гнучкості конфігураційної побудови є оптимальним рішенням для створення сучасної широкосмугової інфраструктури в умовах сільських населених пунктів з нерівномірним розміщенням житлової забудови та значними просторовими розривами між групами абонентів.

У підрозділі 2.1 здійснено детальне дослідження архітектури системи XG-PON, включаючи структурні та функціональні особливості адмініструючого обладнання OLT, оптичних сплітерів різних коефіцієнтів розгалуження та абонентських терміналів ONU/ONT. Розглянуто принципи формування фізичної та логічної структури мережі, проведено обґрунтування параметрів активного та пасивного обладнання, а також окреслено критерії, що визначають оптимальний вибір елементів мережевої інфраструктури на основі вимог до пропускної здатності, кількості абонентів та геометрії населеного пункту.

У підрозділі 2.2 виконано розрахунок пропускної здатності системи XG-PON з урахуванням характеру трафіку кінцевих користувачів, принципів статистичного

мультиплексування та очікуваних пікових навантажень. Проведено детальний аналіз оптичного бюджету та обчислення загальних втрат у лінії передачі, включаючи протяжність оптичних ділянок, кількість і типи сплітерів, затухання у волоконно-оптичних лініях та технологічні втрати [28] [29]. Паралельно здійснено порівняльний розрахунок для систем GPON, що дозволило підтвердити доцільність переходу до XG-PON з огляду на його вищі допустимі втрати, перспективність модернізації та відповідність очікуваному зростанню абонентського трафіку.

У рамках підрозділу 2.3 сформовано концептуальну та топологічну модель побудови оптичної мережі доступу для конкретного населеного пункту, що характеризується лінійно-розтягнутою структурою забудови та наявністю окремих груп домогосподарств. Обґрунтовано вибір топології типу «дерево» як найбільш технологічно та економічно доцільної в умовах сільської місцевості. Детально розглянуто процес планування траси ВОЛЗ з урахуванням рельєфних та інфраструктурних особливостей, визначено схему розміщення OLT та оптимізовано просторове розташування пасивних сплітерів із урахуванням мінімізації довжин абонентських відгалужень, зменшення втрат та забезпечення рівномірного навантаження між гілками оптичних розподільчих мереж.

Узагальнюючи результати виконаних досліджень і розрахунків, можна стверджувати, що запропонована архітектура мережі XG-PON забезпечує відповідність набору технічних параметрів вимогам до сучасних широкосмугових систем доступу [30]. Ретельно розроблена топологія, оптимізована конфігурація пасивних елементів та коректно визначені параметри оптичної лінії створюють передумови для стабільної роботи мережі, високого рівня надійності, можливості масштабування та поступового впровадження більш високошвидкісних технологій наступних поколінь.

Розділ 2 формує теоретичну й інженерну основу для подальшої реалізації практичного етапу проєктування, який буде розглянуто у наступному розділі та міститиме безпосереднє опрацювання схеми розгортання мережі.

3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАКТИЧНОЇ МОДЕЛІ МЕРЕЖІ XG-PON ДЛЯ СІЛЬСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ

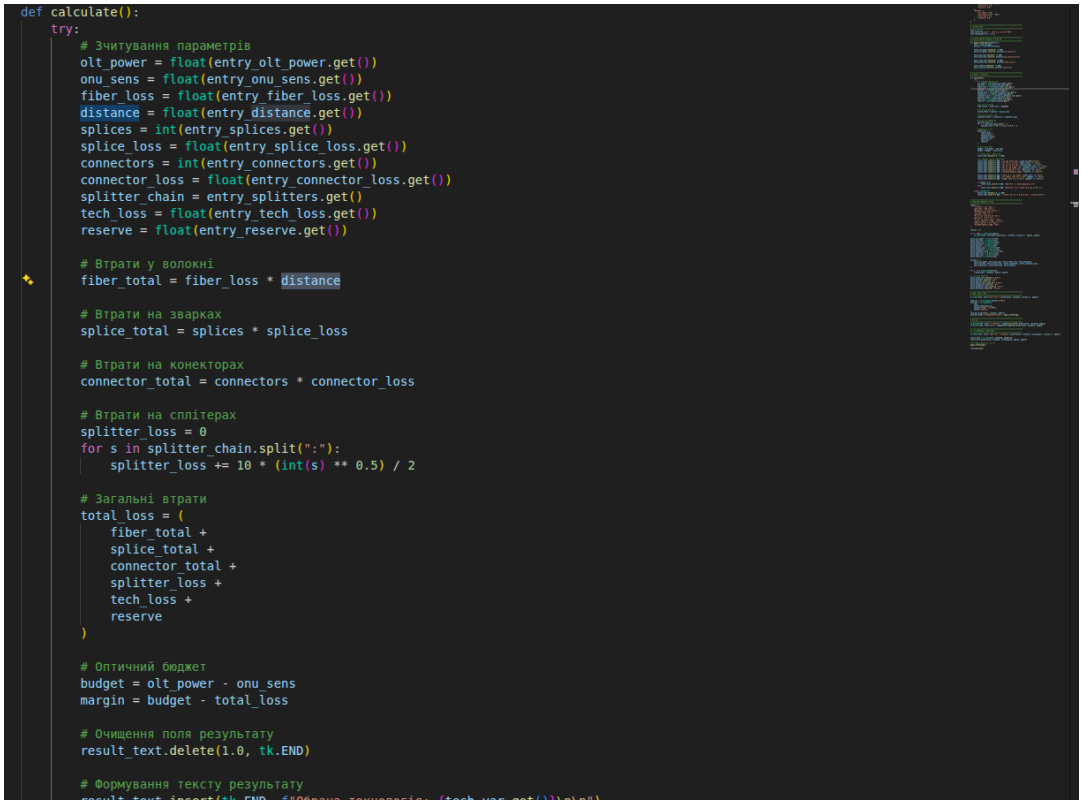
3.1 Моделювання роботи мережі доступу на основі технології XG-PON

Проєктування сучасних волоконно-оптичних мереж доступу для сільських територій потребує не лише теоретичного обґрунтування вибору технології, але й детального дослідження її роботи в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. У цьому контексті моделювання виступає ключовим інструментом, який дозволяє на етапі проєктування оцінити працездатність мережі, визначити запас оптичного бюджету, проаналізувати вплив довжини ліній, кількості пасивних елементів та особливостей топології на якість передачі сигналу. Для мереж доступу на основі XG-PON моделювання є особливо актуальним, оскільки дана технологія орієнтована на обслуговування значної кількості абонентів при великих відстанях між вузлами мережі, що характерно саме для сільської місцевості.

У межах даного дослідження моделювання роботи мережі XG-PON реалізовано шляхом створення аналітично-розрахункової моделі, яка відображає структуру реальної мережі доступу з урахуванням територіальних, топологічних та технічних обмежень. Основною метою моделювання є перевірка відповідності обраної архітектури мережі вимогам стандарту XG-PON, а також порівняльна оцінка можливостей технологій XG-PON та GPON для однакових умов розгортання.

Для реалізації моделі використано програмне середовище, створене мовою програмування Python з графічним інтерфейсом на основі бібліотеки Tkinter. Часину коду преставнело на рисунку 3.1. Графічний інтерфейс програми представлено на рисунку 3.2. Вибір даного середовища обумовлений його універсальністю, відкритістю та можливістю реалізації інженерних розрахунків із достатньою точністю. Розроблений програмний засіб дозволяє здійснювати інтерактивне моделювання параметрів мережі доступу, змінювати вхідні дані та

оперативно отримувати результати розрахунків оптичного бюджету для різних зон абонентів.



```python
def calculate():
    try:
        # Зчитування параметрів
        olt_power = float(entry_olt_power.get())
        onu_sens = float(entry_onu_sens.get())
        fiber_loss = float(entry_fiber_loss.get())
        distance = float(entry_distance.get())
        splices = int(entry_splices.get())
        splice_loss = float(entry_splice_loss.get())
        connectors = int(entry_connectors.get())
        connector_loss = float(entry_connector_loss.get())
        splitter_chain = entry_splitters.get()
        tech_loss = float(entry_tech_loss.get())
        reserve = float(entry_reserve.get())

        # Втрати у волокні
        fiber_total = fiber_loss * distance

        # Втрати на зварках
        splice_total = splices * splice_loss

        # Втрати на конекторах
        connector_total = connectors * connector_loss

        # Втрати на сплітерах
        splitter_loss = 0
        for s in splitter_chain.split(":"):
            splitter_loss += 10 * (int(s) ** 0.5) / 2

        # Загальні втрати
        total_loss = (
            fiber_total +
            splice_total +
            connector_total +
            splitter_loss +
            tech_loss +
            reserve
        )

        # Оптичний бюджет
        budget = olt_power - onu_sens
        margin = budget - total_loss

        # Очищення поля результату
        result_text.delete(1.0, tk.END)

        # Формування тексту результату
```

Рис. 3.1 Частина коду калькулятора для розрахунку оптичного бюджету який написаний мовою Python.

Модель мережі доступу побудована відповідно до архітектури пасивної оптичної мережі типу «точка – багатоточка», в якій центральним елементом є оптичний лінійний термінал OLT, розміщений у вузлі доступу оператора. Від OLT через магістральні та розподільчі волоконно-оптичні лінії здійснюється передача сигналу до пасивних оптичних сплітерів різної кратності, після чого сигнал розподіляється між кінцевими абонентськими пристроями ONU/ONT. Така структура є типовою для мереж XG-PON і дозволяє ефективно використовувати волоконну інфраструктуру при мінімальній кількості активних елементів у полі.

При моделюванні враховано реальну схему розміщення абонентів у сільському населеному пункті, що було поділено на тринадцять зон обслуговування. Кожна зона характеризується власною довжиною волоконно-оптичної лінії, кількістю зварних з’єднань, числом оптичних конекторів, а також

конфігурацією пасивних сплітерів. Такий підхід дозволяє детально дослідити неоднорідність умов розгортання мережі, яка є типовою для сільської місцевості, де щільність забудови та відстані між абонентами можуть істотно відрізнятися навіть у межах одного населеного пункту.

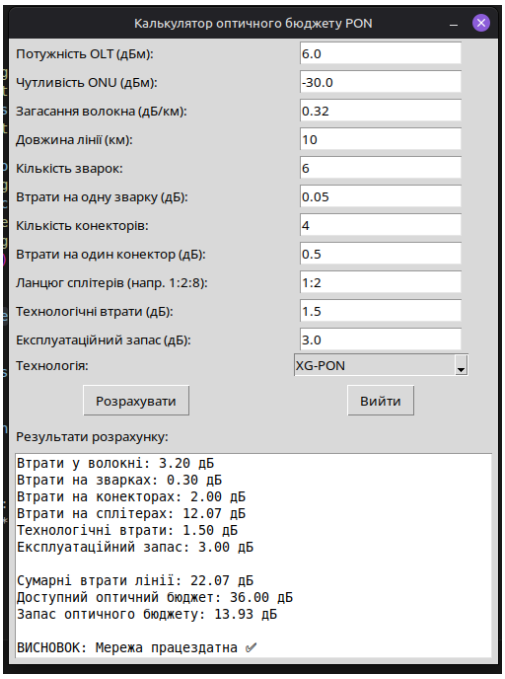


Рис. 3.2 Графічний інтерфейс калькулятора для розрахуку оптичного бюджету який написаний мовою Python

У процесі моделювання для кожної зони виконано розрахунок сумарних втрат оптичної лінії, що включають втрати у волокні, втрати на зварках, втрати на конекторах, втрати на пасивних оптичних сплітерах, а також технологічні втрати та експлуатаційний запас. Значення коефіцієнтів втрат обрано відповідно до рекомендацій стандартів ITU-T та технічної документації виробників обладнання. Такий підхід забезпечує адекватність моделі та дозволяє розглядати отримані результати як інженерно обґрунтовані.

Особливу увагу під час моделювання приділено аналізу впливу пасивних сплітерів на оптичний бюджет мережі. У сільських умовах, з метою оптимізації витрат, часто застосовується каскадне підключення сплітерів різної кратності, зокрема 1:2 та 1:4 уздовж основних вулиць і 1:8 або 1:16 на відгалуженнях до кінцевих абонентів. Така архітектура дозволяє зменшити довжину індивідуальних

підключень, проте істотно збільшує втрати потужності, що повинно бути враховано на етапі проєктування. Модель дозволяє дослідити ці ефекти та оцінити допустимість обраної конфігурації для різних технологій PON.

Паралельно з моделюванням мережі XG-PON виконано аналогічні розрахунки для технології GPON з метою проведення коректного порівняльного аналізу. Для обох технологій використовувалися однакові топологічні умови, довжини ліній та конфігурації пасивних елементів, що дозволяє безпосередньо оцінити вплив відмінностей у доступному оптичному бюджеті на працездатність мережі. Зокрема, для XG-PON прийнято доступний оптичний бюджет 36 дБ, тоді як для GPON — 32 дБ, що відповідає типовим значенням для промислового обладнання.

Результати моделювання демонструють, що для більшості зон абонентів обидві технології забезпечують працездатність мережі, однак у випадках із великою сумарною кратністю сплітерів та значними технологічними втратами мережа GPON працює з мінімальним запасом або виходить за межі допустимого оптичного бюджету. Натомість XG-PON у тих самих умовах зберігає позитивний запас потужності, що свідчить про її більшу стійкість до деградації параметрів лінії та більший потенціал масштабування. Що свідчить про економічну доцільність використання цієї технології.

Таким чином, виконане моделювання підтверджує доцільність використання технології XG-PON для побудови мереж доступу у сільській місцевості. Розроблена модель дозволяє не лише оцінити поточну працездатність мережі, але й прогнозувати її поведінку при подальшому розширенні, підключенні додаткових абонентів або зміні топології. Отримані результати створюють основу для подальшого аналізу показників продуктивності та якості обслуговування, що буде розглянуто в наступному підрозділі. Де буде представлено прівняльну таблицю технологій GPON та XG-PON.

3.2 Аналіз показників продуктивності мережі та оцінка оптичного бюджету

Одним із ключових етапів дослідження працездатності волоконно-оптичної мережі доступу є аналіз показників продуктивності та якості функціонування, основним з яких для пасивних оптичних мереж є відповідність сумарних втрат лінії доступному оптичному бюджету. Для технологій сімейства PON саме оптичний бюджет визначає максимально допустиму довжину лінії, кількість пасивних елементів у тракті передачі та можливість подальшого масштабування мережі без заміни активного обладнання. У межах даного підрозділу здійснено детальний аналіз результатів моделювання мережі доступу для тринадцяти зон абонентів з використанням технологій XG-PON та GPON.

Аналіз проводився на основі результатів розрахунку сумарних втрат оптичної лінії, які включають погонні втрати у волоконно-оптичному кабелі, втрати на зварних з’єднаннях, втрати на оптичних конекторах, втрати на пасивних оптичних сплітерах, а також технологічні втрати та експлуатаційний запас. Такий підхід відповідає загальноприйнятій інженерній методиці проєктування мереж доступу та дозволяє комплексно оцінити реальні умови роботи мережі в процесі тривалої експлуатації.

Результати моделювання для кожної зони абонентів було систематизовано та зведено у порівняльну таблицю, що дозволяє наочно оцінити відмінності між технологіями XG-PON та GPON за однакових топологічних та фізичних умов розгортання мережі.

Порівняння результатів розрахунку оптичного бюджету для XG-PON та GPON представлено у таблиці 3.1.

Аналіз даних, наведених у таблиці 3.1, свідчить про суттєву перевагу технології XG-PON порівняно з GPON при розгортанні мереж доступу в умовах сільської місцевості. У більшості зон абонентів XG-PON забезпечує значний запас оптичного бюджету, який у ряді випадків перевищує 10–20 дБ. Такий запас є критично важливим з точки зору довгострокової експлуатації мережі, оскільки він

компенсує старіння оптичного волокна, можливі додаткові зварні з’єднання, деградацію конекторів та похибки монтажу.

Для технології GPON результати моделювання демонструють, що хоча в більшості зон мережа формально залишається працездатною, запас оптичного бюджету в окремих випадках є мінімальним і не перевищує 0.4–0.6 дБ. Такий режим роботи є граничним і не відповідає вимогам надійності, що пред’являються до мереж доступу, особливо в умовах сільської місцевості, де аварійні та відновлювальні роботи ускладнені значними відстанями та обмеженим доступом до інфраструктури.

Таблиця 3.1

Порівняльний аналіз оптичного бюджету мережі доступу для технологій XG-PON та GPON

Зона абонентів	Сумарні втрати, дБ	Запас бюджету GPON, дБ	Запас бюджету XG-PON, дБ
1	29.78	2.72	6.22
2	29.21	3.29	6.79
3	28.71	3.29	11.89
4	31.92	0.58	4.08
5	32.08	0.42	3.92
6	21.89	10.61	14.11
7	15.98	16.52	20.02
8	26.24	6.26	9.76
9	26.24	6.26	9.76
10	16.23	16.27	19.77
11	25.94	6.56	10.06
12	26.23	6.27	9.77
13	35.47	−3.47	0.03

Особливо показовою є тринадцята зона абонентів, для якої сумарні втрати лінії перевищують доступний оптичний бюджет GPON, що робить використання цієї технології технічно неможливим без зміни топології або зменшення кратності сплітерів. Водночас XG-PON у цій зоні забезпечує позитивний, хоча й мінімальний, запас бюджету, що підтверджує її більшу адаптивність до складних умов розгортання.

Таким чином, результати аналізу підтверджують, що технологія XG-PON є більш придатною для побудови мереж доступу у сільській місцевості з розгалуженою топологією та нерівномірним розміщенням абонентів. Збільшений оптичний бюджет XG-PON забезпечує підвищену стійкість мережі до впливу пасивних втрат та створює резерв для подальшого розвитку мережі без необхідності модернізації базового активного обладнання.

3.3 Оптимізація параметрів мережі доступу XG-PON для умов сільської місцевості та оцінка економічної доцільності

Проєктування мереж доступу для сільських територій характеризується низкою специфічних вимог, серед яких ключовими є значні відстані між абонентами, нерівномірна щільність забудови, обмежені можливості для прокладання кабельної інфраструктури та підвищені вимоги до надійності роботи мережі. За таких умов оптимізація параметрів мережі доступу набуває особливої важливості, оскільки дозволяє досягти балансу між технічними можливостями, якістю надання послуг та економічною ефективністю проєкту.

Одним з основних параметрів, що безпосередньо впливає на працездатність мережі XG-PON у сільській місцевості, є довжина оптичної лінії між вузлом доступу OLT та кінцевими абонентами. Результати моделювання, наведені у попередньому підрозділі, показали, що зі збільшенням довжини лінії сумарні втрати зростають лінійно, однак завдяки підвищеному оптичному бюджету XG-PON навіть при значних відстанях зберігається позитивний запас потужності. Це дозволяє використовувати магістральні ділянки більшої довжини без необхідності встановлення проміжних активних елементів, що є критично важливим для сільських територій, де електроживлення та фізичний доступ до обладнання можуть бути обмеженими.

Не менш важливим фактором є кількість абонентів, підключених до одного порту OLT через каскад пасивних оптичних сплітерів. У процесі оптимізації було встановлено, що застосування сплітерів малої кратності на магістральних ділянках,

зокрема 1:2 та 1:4 уздовж основних доріг, дозволяє зменшити втрати на ранніх етапах розгалуження та сформувати достатній запас оптичного бюджету для подальших розгалужень. Використання сплітерів більшої кратності, таких як 1:6 або 1:8, доцільне на кінцевих ділянках мережі безпосередньо перед підключенням абонентів, де довжина ліній є меншою, а ризик перевищення допустимих втрат — мінімальним.

Оптимізація топології мережі також відіграє важливу роль у підвищенні ефективності функціонування мережі доступу. Для умов сільської місцевості найбільш доцільною є деревоподібна топологія, яка забезпечує простоту реалізації, мінімізацію довжини кабельних трас та можливість гнучкого масштабування мережі в разі появи нових абонентів. Результати моделювання підтверджують, що така топологія у поєднанні з технологією XG-PON дозволяє досягти високого рівня надійності без значного збільшення капітальних витрат.

Оцінка економічної доцільності впровадження мережі XG-PON у сільській місцевості проводилась з урахуванням вартості активного та пасивного обладнання, витрат на прокладання волоконно-оптичних ліній зв’язку, а також експлуатаційних витрат упродовж життєвого циклу мережі. Хоча початкова вартість обладнання XG-PON є дещо вищою порівняно з GPON, результати аналізу показують, що за рахунок більшого оптичного бюджету та можливості підключення більшої кількості абонентів без модернізації інфраструктури загальна вартість володіння мережею у довгостроковій перспективі є нижчою.

Додатковою перевагою XG-PON є можливість забезпечення значно вищої пропускної здатності для кінцевих користувачів, що є важливим чинником з огляду на зростання попиту на широкосмугові послуги, включаючи потокове відео високої роздільної здатності, хмарні сервіси та дистанційне навчання. У сільських населених пунктах, де альтернативні технології доступу часто мають обмежену швидкість або нестабільну якість з’єднання, впровадження XG-PON створює передумови для подолання цифрової нерівності між містом і селом.

Порівняльний аналіз результатів моделювання для XG-PON та GPON підтверджує, що технологія GPON у ряді випадків працює на межі допустимого

оптичного бюджету або взагалі не забезпечує працездатність мережі при складній топології та великій протяжності ліній. Натомість XG-PON демонструє значний запас потужності, який дозволяє компенсувати додаткові втрати, пов’язані з особливостями реального монтажу, а також забезпечує можливість подальшого розвитку мережі без суттєвих фінансових вкладень.

Таким чином, результати оптимізації параметрів мережі та оцінки економічної доцільності підтверджують, що впровадження технології XG-PON є технічно обґрунтованим та економічно доцільним рішенням для побудови мереж доступу в умовах сільської місцевості. Поєднання високого оптичного бюджету, гнучкості топології та перспективності з точки зору розвитку послуг робить XG-PON оптимальним вибором для забезпечення надійного та якісного широкосмугового доступу до мережі Інтернет у сільських населених пунктах.

Висновок до розділу 3 - У третьому розділі магістерської роботи здійснено детальне моделювання та дослідження функціонування мережі доступу на основі технології XG-PON у сільських територіях. На основі аналізу топологічних особливостей населених пунктів було побудовано практичну модель мережі. Було проведено розрахунок сумарних втрат оптичного сигналу, включаючи втрати у волокні, втрати на зварках та конекторах, втрати на сплітерах, технологічні втрати та експлуатаційний запас, що дозволило визначити доступний оптичний бюджет для кожної зони абонентів.

Результати розрахунків засвідчили, що технологія XG-PON забезпечує значно більший запас оптичного бюджету порівняно з GPON

Таким чином, розроблена модель мережі та проведені дослідження дозволяють зробити висновок про високу ефективність технології XG-PON у сільських територіях, що підтверджує її переваги з точки зору стабільності передачі сигналу, економічної доцільності та можливості масштабування мережі для обслуговування великої кількості абонентів

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі на тему «Розробка та дослідження мережі доступу на основі технології XG-PON для сільської місцевості» виконано комплексне дослідження сучасних волоконно-оптичних технологій доступу з метою обґрунтування доцільності застосування технології XG-PON для забезпечення широкосмугового доступу до телекомунікаційних послуг у сільських територіях. Актуальність обраної теми зумовлена зростанням потреби у високошвидкісному доступі до мережі Інтернет, обмеженістю існуючої інфраструктури в сільській місцевості та необхідністю підвищення пропускної здатності й масштабованості мереж доступу.

У першому розділі роботи проведено аналіз сучасних оптоволоконних технологій доступу та принципів побудови пасивних оптичних мереж. Розглянуто архітектурні особливості технологій GPON, XG-PON, XGS-PON та NG-PON2, проаналізовано їхні технічні характеристики, ефективність використання смуги пропускання, вимоги до оптичної розподільної мережі та економічні аспекти впровадження. На основі виконаного аналізу визначено, що технологія XG-PON є оптимальним компромісом між вартістю розгортання та забезпеченням високої пропускної здатності для сільських абонентів.

У другому розділі виконано проєктування мережі доступу на основі технології XG-PON. Розглянуто основні елементи мережі, принципи формування її структурної та функціональної схем, а також здійснено розрахунок пропускної здатності й оптичного бюджету ліній передачі. Проведені розрахунки дозволили оцінити вплив довжини волоконно-оптичних ліній, кількості зварних з’єднань, конекторів і оптичних сплітерів на сумарні втрати сигналу та підтвердили можливість побудови працездатної мережі XG-PON у заданих умовах. Окрему увагу приділено порівняльному аналізу результатів розрахунків для технологій XG-PON та GPON, що дозволило продемонструвати переваги XG-PON за показниками доступного оптичного бюджету та запасу потужності.

У третьому розділі виконано моделювання та дослідження роботи мережі доступу XG-PON для сільської місцевості. На основі практичної моделі мережі проведено аналіз показників продуктивності та якості обслуговування, зокрема втрат потужності сигналу та запасу оптичного бюджету для різних зон абонентів. Отримані результати показали, що у більшості розглянутих сценаріїв технологія XG-PON забезпечує суттєво більший запас оптичного бюджету порівняно з GPON, що підвищує надійність мережі, її масштабованість та перспективність подальшого розвитку. Виявлено, що в умовах значних коефіцієнтів розгалуження та збільшених довжин ліній GPON наближається до граничних значень бюджету або втрачає працездатність, тоді як XG-PON залишається функціонально придатною.

Ключові моменти дослідження за темою кваліфікаційної магістерської роботи автора викладено у тезах на науково-практичних конференціях за темою «РОБОТА ЦИВІЛЬНОГО РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ В УМОВАХ РОБОТИ ПРИСТРОЇВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ (РЕБ)», що забезпечило апробацію отриманих наукових результатів, розширило науковий кругозір автора та підтвердило його здатність до самостійної дослідницької роботи.

Узагальнюючи результати виконаної магістерської роботи, можна зробити висновок, що поставлена мета досягнута, а всі визначені завдання виконані в повному обсязі. Отримані результати мають практичну цінність та можуть бути використані під час проєктування й модернізації мереж доступу на основі технології XG-PON у сільській місцевості.