

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних наук,
управління та адміністрування
Кафедра інформаційних технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: "Дослідження та вдосконалення використання технології
GPON для підвищення ефективності передавання даних в
інформаційно-комунікаційних мережах"

Виконав студент 2 курсу групи МІС-22
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
Голосний Максим Андрійович

Керівник д. техн.наук, професор
Казакова Наталія Феліксівна

Рецензент начальник ІОЦ ОНЕУ
к.т.н., Домаскін Олег Михайлович

АНОТАЦІЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу «Дослідження та вдосконалення використання технології GPON для підвищення ефективності передавання даних в інформаційно-комунікаційних мережах», студента Голосного Максима Андрійовича

Тема магістерської роботи «Дослідження та вдосконалення використання технології GPON для підвищення ефективності передавання даних в інформаційно-комунікаційних мережах».

Актуальність теми магістерської роботи полягає в здатності забезпечувати високу пропускну здатність для передавання даних, ефективно використання оптоволоконних ліній, а також в енергонезалежному обладнанні, що працюватиме в умовах без світла. Ця технологія відіграє ключову роль у розвитку сучасних комунікацій, забезпечуючи швидкий доступ до інтернету. В умовах зростаючого обсягу інформації, що передається, і збільшення числа підключених пристроїв GPON стає важливим елементом інфраструктури, сприяючи сучасному цифровому прогресу.

Метою роботи є дослідження та оптимізація застосування технології GPON для підвищення ефективності передачі даних у сфері інформаційно-комунікаційних мереж..

Об'єктом дослідження є технологія GPON (гігабітний пасивний оптичний мережевий) - конкретна інфраструктурна технологія передачі даних через оптоволоконні лінії.

Предметом дослідження є використання технології GPON для підвищення ефективності передавання даних в інформаційно-комунікаційних мережах.

У роботі було проведено дослідження технологій GPON та варіанти її подальшого розвитку.

Практична цінність даної роботи полягає в можливості вдосконалення та оптимізації використання технології GPON в інформаційно-комунікаційних

мережах. Результати дослідження можуть стати підґрунтям для впровадження конкретних заходів і вдосконалення існуючих мереж, що сприятиме підвищенню ефективності передачі даних. Це може включати в себе оптимізацію швидкості передачі, забезпечення більшої стійкості мережі та зменшення можливих обмежень.

Ключові слова: GPON, ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ МЕРЕЖІ, ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ІНФРАСТРУКТУРА ЗВ'ЯЗКУ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ВДОСКОНАЛЕННЯ, ОПТОВОЛОКОННІ ЛІНІЇ, ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ, ОПЕРАТОРИ ЗВ'ЯЗКУ.

Магістерська робота містить 74 сторінки, 9 таблиць, 22 рисунка, 11 посилань.

ABSTRACT

for a master's thesis

" Research and improvement of the use of GPON technology to increase the efficiency of data transmission in information and communication networks ",

student Holosnyi Maksym

The topic of the master's thesis is "Research and improvement of the use of GPON technology to increase the efficiency of data transmission in information and communication networks".

The relevance of the master's thesis topic lies in the ability to provide high bandwidth for data transmission, efficient use of fiber optic lines, as well as in non-volatile equipment that can operate in conditions without light. This technology plays a key role in the development of modern communications, providing fast access to the Internet. With the growing volume of transmitted information and the increasing number of connected devices, GPON is becoming an important element of infrastructure, contributing to modern digital progress.

The purpose of the study is to investigate and optimize the use of GPON technology to improve the efficiency of data transmission in the field of information and communication networks.

The object of the study is GPON (Gigabit Passive Optical Network) technology, a specific infrastructure technology for data transmission over fiber optic lines.

The subject of the study is the use of GPON technology to improve the efficiency of data transmission in information and communication networks.

The paper investigates GPON technology and options for its further development.

The practical value of this work lies in the possibility of improving and optimizing the use of GPON technology in information and communication networks. The results of the study can become the basis for implementing specific measures and improving existing networks, which will help to increase the

efficiency of data transmission. This may include optimizing the transmission rate, ensuring greater network resilience, and reducing possible limitations.

Keywords: GPON, DATA TRANSMISSION EFFICIENCY, INFORMATION AND COMMUNICATION NETWORKS, NETWORK OPTIMIZATION, BANDWIDTH, COMMUNICATION INFRASTRUCTURE, TECHNOLOGICAL IMPROVEMENTS, FIBER OPTIC LINES, PRACTICAL VALUE, TELECOM OPERATORS.

The master's thesis contains 74 pages, 9 tables, 22 figures, 11 references.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ | 6 |
| ВСТУП | 8 |
| 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ | 9 |
| 1.1 Актуальність теми | 9 |
| 1.2 Поведінка трафіку | 12 |
| 1.3 Мета та завдання дослідження | 14 |
| 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ PON | 16 |
| 2.1 Відмінності між активними та пасивними оптичними мережами | 16 |
| 2.2 Переваги та недоліки | 17 |
| 2.3 Втрати під час використання оптоволоконного кабелю | 19 |
| 2.4 Вплив розсіювання | 21 |
| 2.5 Топології мережі | 22 |
| 2.6 Вимоги та основні принципи побудови PON | 27 |
| 3 ПОРІВНЯННЯ GPON З КОНКУРУЮЧИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ | 38 |
| 3.1 Основні відомості про EPON | 38 |
| 3.2 Основні відомості про GPON | 41 |
| 3.3 Порівняльний аналіз витрат на обладнання для технологій EPON і GPON | 46 |
| 3.4 Порівняння споживання електроенергії | 48 |
| 4 ВДОСКОНАЛЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ GPON | 50 |
| 4.1 Невідповідність динамічного діапазону активного обладнання бюджету загасання GPON для різних довжин хвиль | 50 |
| 4.2 Розвиток Гібридних TDM-WDM Технологій у Системах PON | 57 |
| 4.3 Симетричний тип підключення | 67 |
| ВИСНОВКИ | 74 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ | 76 |

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

| | |
|---------|--|
| GPON | – Gigabit Passive Optical Network. |
| OLT | – Optical Linear Terminal (Оптичний лінійний термінал). |
| ONT | – Optical Network Terminal (Оптичний мережевий термінал). |
| PON | – Passive Optical Network. |
| FTTx | – fiber to the x (Оптичне волокно до точки X). |
| ОРК | – Оптична розподільна коробка. |
| ОРШ | – Оптична розподільна шафа. |
| ODF | – Basic of Optical Distribution Frame (Оптичний розподільний пристрій). |
| ВЗВР | – Вузли зв'язку в районах. |
| xDSL | – digital subscriber line (Цифрова абонентська лінія). |
| ADSL2+ | – Asymmetric Digital Subscriber Line (асиметрична цифрова абонентська лінія). |
| ODN | – Optical distribution network (Оптична розподільна мережа). |
| ОВК | – Оптоволоконні кабелі. |
| LAN | – Local Area Network (Локальна мережа). |
| POF | – Polymer Optical Fibre (Полімеропластикові оптоволоконні кабелі). |
| PCF | – Plastic Cladded Fibre (Волокно з пластиковим покриттям). |
| GOF | – Glass Optical Fiber (Скляне оптичне волокно). |
| АТС | – Автоматична телефонна станція. |
| PtMP | – Point-to-multipoint (точка–мультиточка). |
| CSMA/CD | – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (Множинний доступ з визначенням несучої та виявленням колізій). |
| SLA | – Service–Level Agreement (Угода про рівень обслуговування). |

| | |
|--------|---|
| QoS | – Quality of Service (Рівень сервісу або обслуговування). |
| TDMA | – Time Division Multiple Access (Множинний доступ із поділом за часом). |
| SFD | – Start of Frame Delimiter (Початок роздільника кадрів). |
| CRC | – Cyclic redundancy check (Циклічний надлишковий код). |
| SOP | – Start of packet (Початок пакету). |
| LLID | – Logical link identifier (Ідентифікатор логічного зв'язку). |
| DA | – Destination address (Адреса призначення). |
| SA | – Source address (Вихідна адреса). |
| L/T | – Length/type (Довжина/тип). |
| Pad | – Наповнювач. |
| FCS | – Frame check sequence (Послідовність перевірки кадрів). |
| Opcode | – Optional code (необов'язковий код). |
| TS | – Time stamp (Позначка часу). |

ВСТУП

Технологія GPON, або Gigabit PON, була впроваджена відносно недавно. У 2014 році відзначається 45 – річчя з моменту проведення першого комп'ютерного сеансу зв'язку в США на відстані приблизно 640 км. Ця подія вважається відправною точкою в історії виникнення Інтернету. Однак на той момент мережа ARPANET була доступна лише невеликій кількості дослідників і організацій. Доступ для широкої аудиторії став реальністю тільки 1991 року, коли він став доступний комп'ютерним користувачам. Значне збільшення аудиторії інтернету відбулося 1993 року з появою веб-браузера NCSA Mosaic, що стало відправною точкою для вибухового зростання кількості користувачів мережі. Отже, історія масового використання Інтернету на поточний момент, у 2023 році, налічує всього 30 років.

У перше десятиліття розвитку глобальної мережі лише деякі користувачі звертали увагу на такий параметр, як пропускна здатність каналу зв'язку (швидкість передавання даних у бітах) або пов'язані з цим характеристики смуги пропускання. Вони були знайомі швидше з теоретичними основами радіотехніки. Сьогодні ж усі користувачі обговорюють швидкість інтернету і прагнуть доступу до високошвидкісного інтернету.

Для звичайного користувача швидкість інтернету насамперед пов'язана з часом, необхідним для завантаження великих відео-, аудіо – та графічних файлів. Кількість таких файлів у мережі зростає експоненціально, а їхні розміри збільшуються. Корпоративним клієнтам, а також тим, хто використовує онлайн і хмарні сервіси, важлива висока швидкість реакції на запити в системах управління бізнесом.

Таким чином, високошвидкісний інтернет сьогодні – це необхідність, а не розкіш, як для звичайних користувачів, так і для підприємств. Фахівці вважають, що наразі поріг високошвидкісного інтернету проходить на рівні 10 Мб/с.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Актуальність теми

Світова комп'ютерна мережа почала свій розвиток, використовуючи наявні телефонні лінії та технології xDSL. Серед різних "мідних" технологій, ADSL2+ з його максимальною швидкістю вхідного потоку в 24 Мб/с (вихідного – 1,2 Мб/с), став найбільш просунутим у цьому сімействі. Наразі він є абсолютним лідером за кількістю підключень у всіх країнах світу. Однак мідні лінії зв'язку, які були встановлені десятиліття тому, старіють і фізично, і технологічно, і поступово замінюються оптичними мережами FTTx. Використання оптичних мереж FTTx дає змогу значно збільшити швидкість передавання даних в Інтернеті – удвічі і навіть більше. В останні п'ять років процес заміни мідних кабельних ліній на оптичні стає дедалі інтенсивнішим, і аналітики пророкують, що ще за п'ять років співвідношення "оптика/мідь" у телекомунікаціях кардинально зміниться на користь оптичних технологій.

Архітектура FTTx являє собою відрізок оптоволоконної лінії зв'язку, що під'єднується з одного боку до приймально–передавальної станції OLT (Optical Line Terminal – оптичний лінійний термінал), розміщеної в оператора, та з іншого – до приймально–передавальних модулів абонентів, які називаються ONT або ONU.

ONT – це термінал індивідуального користування, що встановлюється у квартирах користувачів, і також називається оптичним модемом. ONU призначений для розміщення в розподільних шафах багатоквартирних будинків і має кілька портів для під'єднання комп'ютерів, телевізорів, телефонів, які знаходяться в сусідніх квартирах.

ONT і ONU виконують перетворення оптичних сигналів, отриманих від OLT, на електричні сигнали, які спрямовують, наприклад, у комп'ютери, телевізори та телефони, а також зворотне перетворення електричних сигналів,

що надходять від користувацьких пристроїв, на оптичні сигнали, які передають в OLT.

Якщо в оптичний лінійний відрізок впровадити сплітери (пасивні роздільники сигналу, одержуваного від OLT), і під'єднати до них ONT, це призведе до переходу від структури FTTx з однією оптоволоконною лінією до деревоподібної структури, що створить пасивну оптичну мережу, відому як PON (Passive Optical Network).

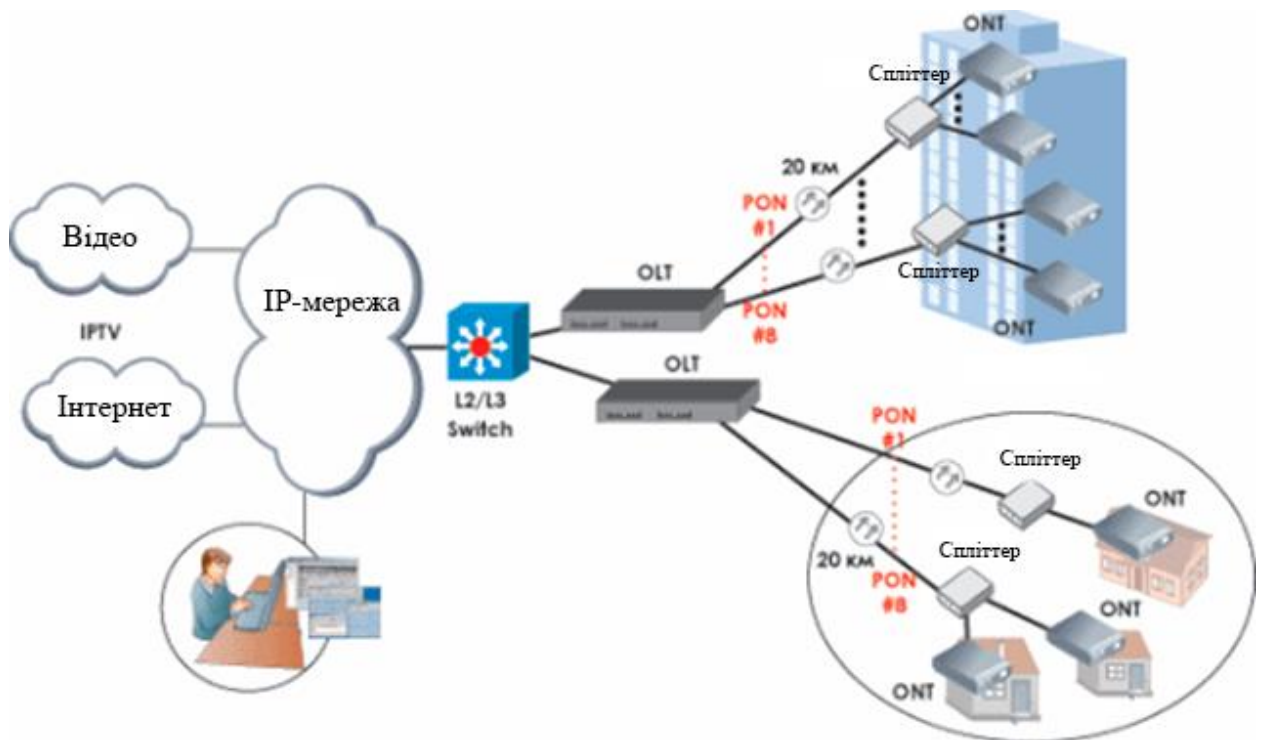


Рисунок 1.1 –Відрізок оптичної лінії

Робота PON полягає в організації множинного доступу через одне оптоволоконно за допомогою часового мультиплексування (Time Division Multiplexing Access – TDMA) і частотного поділу трактів приймання і передавання (Wavelength–Division Multiplexing – WDM). Мультиплексори WDM, що працюють у складі OLT і ONT, розділяють прямий (вхідний) і зворотні (вихідні) сигнали, що транслюються на різних довжинах хвиль (прямий – 1,49 мкм, зворотний – 1,31 мкм). До цих потоків може бути доданий сигнал кабельного телебачення, що передається на довжині хвилі 1,55 мкм.

Первые технологии PON начали развиваться около 15 лет назад. Проі за час, що минув, Міжнародний союз електрозв'язку (МЄЗ) випустив п'ять стандартів передавання даних оптоволоконном. Активне обладнання, випущене відповідно до вимог цих стандартів, забезпечує швидкості від 155 Мб/с до 2488 Мб/с.

Швидкість передачі даних у прямому потоці GPON становить 2,5 Гб/с, тоді як у GEPON вона становить 1,25 Гб/с.

Максимальна кількість абонентських вузлів, під'єднаних до однієї оптоволоконної лінії, в стандарті GPON становить 64, в той час як в GEPON це число обмежене 16. Це призводить до більш низької вартості порту на одного абонента в оптичному терміналі оператора, відповідного до стандарту GPON, і значно меншому енергоспоживанню станційного устаткування в порівнянні з устаткуванням, відповідним до стандарту GEPON.

Завантаженість смуги пропускання в технології GPON становить щонайменше 93%, тоді як у GEPON вона не перевищує 60%. Ця відмінність пов'язана із застосуванням в активному обладнанні GPON технології фрагментації кадрів GEM (GTC Encapsulation Method), яка підвищує ефективність використання смуги пропускання. У GEPON такий механізм відсутній.

Технології GPON залишається актуальною і значущою в умовах зимових блекаутів світла з низки причин:

Надійність зв'язку в умовах кризи енергопостачання: GPON, як і інші технології оптичних мереж, може працювати навіть за відсутності електроживлення на рівні абонента. Це особливо важливо в разі зимових блекаутів, коли енергосистема може зазнавати збоїв через погодні умови.

Висока пропускна здатність для забезпечення комунікацій: GPON забезпечує високу пропускну здатність передачі даних, що особливо важливо в умовах кризи, коли мережі зв'язку можуть стикатися зі збільшеним обсягом трафіку через необхідність обміну інформацією та координації дій.

Масштабованість і гнучкість мережі: Технологія GPON забезпечує можливість масштабування мережі для підключення великої кількості абонентів. В умовах кризи це важливо для забезпечення зв'язку з великою кількістю людей, включно з аварійними службами, державними органами та цивільними особами.

Оптимізація ресурсів: GPON використовує пасивне оптичне обладнання, що зменшує залежність від активних елементів у мережі та дає змогу оптимізувати енергоспоживання. Це може бути корисним в умовах блекауту, коли ресурси електроенергії обмежені.

Швидке відновлення після аварії: У разі пошкодження оптичного волокна, відновлення мережі GPON може бути відносно швидким та ефективним. Це важливо для мінімізації перерв у зв'язку, особливо в ситуаціях, коли зв'язок відіграє критичну роль.

Сучасні вимоги до зв'язку: Зі збільшенням значущості віддаленої роботи, навчання та медичних консультацій, технології, такі як GPON, стають невід'ємною частиною забезпечення ефективної комунікації в умовах будь-яких непередбачуваних обставин, включаючи блекаути.

Таким чином, технологія GPON залишається актуальною в умовах зимових блекаутів, надаючи надійні, високошвидкісні та стійкі комунікації в умовах кризи.

1.2 Поведінка трафіку

Спосіб передбачити, який тип технології буде використовуватися або впроваджуватися в майбутньому, ґрунтується на аналізі затребуваних послуг, підтримуваних цією технологією, або попиту на саму технологію. У цьому контексті для дослідження PON важливий як фіксований, так і мобільний трафік. Надійним джерелом статистики попиту на послуги, пов'язані з мережами PON, є прогнозний аналіз трафіку компанії Cisco [1][2]. Cisco очікує, що в останні роки сукупний річний темп зростання (CAGR) мобільного

трафіку становитиме 57 % і в 2024 році досягне 24,3 ексабайт на місяць. Очікується, що цей трафік генеруватиметься більш ніж 1 мільярдом підключених мобільних пристроїв, включно з модулями "машина-машина" (M2M). Вторгнення M2M і "розумних" пристроїв, таких як смартфони та планшети, стане основною причиною зростання трафіку в мережах через великий обсяг даних, які генерують ці пристрої порівняно з "несмарт"-пристроями. У зв'язку з цим передбачається, що до 2023 року "розумний" трафік становитиме 97 % від загального трафіку, що генерується мобільними пристроями. Швидкість широкопasmового зв'язку на фіксованих терміналах безпосередньо залежить від розгортання FTTH, зростання швидкості широкопasmового зв'язку призводить до збільшення кількості застосунків, які потребують більшу пропускну здатність.

Вплив зростання попиту на послуги та високої пропускнуої спроможності також відбивається на швидкості широкопasmового доступу. Очікується, що середня швидкість широкопasmового доступу у світі зросте з 50 Мб/с у 2016 році до 100 Мб/с у 2023 році. Високошвидкісний широкопasmовий зв'язок буде необхідний для хмарних сервісів зберігання і завантаження мультимедійних файлів. IP-трафік буде являти собою зростаючу поведінку не тільки для мобільних даних; цей трафік також включає в себе фіксований інтернет, керований IP. Під фіксованим Інтернетом мається на увазі будь-яке IP-з'єднання з будинків, кампусів, компаній, приміщень і державних установ, і його обсяг зросте з 39,9 ексабайт у 2016 році до 111,8 ексабайт у 2023 році. Керований IP пов'язаний з трафіком даних з корпоративних мереж, IP-телебаченням і відео за запитом; він збільшиться з 17,4 ексабайт у 2016 році до 31,8 ексабайт у 2023 році. Мобільні дані охоплюють весь трафік даних зі смартфонів, планшетів і M2M-пристроїв. Деякі фактори, що вплинули на прогноз швидкості, - це розгортання і впровадження FTTH і високошвидкісних цифрових абонентських ліній (HDSL), впровадження кабельного широкопasmового доступу і загальне проникнення широкопasmового доступу.

Прогнозний аналіз трафіку Cisco показує, що трафік і швидкість широкопasmового доступу зростатимуть з роками. Експоненціальне зростання мобільного трафіку показує, що цей тип технології матиме великий вплив на генерування та надсилання трафіку в найближчі роки. Однак мобільний трафік не перевищує IP-трафік, що генерується фіксованим Інтернетом, який також має експоненціальну динаміку. Зростання швидкості широкопasmового зв'язку має більш лінійний характер, але все ж збільшується з роками. Таким чином, оскільки мережевий трафік генерується кінцевими пристроями, доцільно замислитися над впровадженням мереж доступу з ширшими можливостями та вищою пропускнуою здатністю для підтримки майбутніх потреб у трафіку. Мережі PON є можливим рішенням для управління великими обсягами трафіку в сегменті доступу. Було проведено багато досліджень з цієї теми, які тривають і в даний час з метою поліпшення можливостей PON.

1.3 Мета та завдання дослідження

Метою даної дипломної роботи є проведення дослідження та розробка методів для оптимізації та вдосконалення використання технології GPON для підвищення ефективності передачі даних в інформаційно-комунікаційних мережах. Завдання дослідження:

- Аналіз наявної інфраструктури GPON: Провести огляд наявних інфраструктур, що використовують технологію GPON, з метою виявлення поточних проблем і обмежень.
- Оцінка ефективності GPON: Провести аналіз ефективності та продуктивності GPON у різних сценаріях використання, включно з навантаженням на мережу та якістю обслуговування абонентів.
- Порівняння GPON з конкуруючими технологіями: Провести порівняльний аналіз GPON з іншими оптичними і мідними технологіями передачі даних.

- Розробка пропозицій щодо поліпшення GPON: На основі результатів аналізу запропонувати конкретні методи і технічні рішення для поліпшення ефективності GPON, включно зі збільшенням швидкості передавання даних, зниженням затримок і оптимізацією ресурсів.
- Оцінка економічної вигоди: Проаналізувати економічний ефект від впровадження поліпшень у технологію GPON, включно зі зниженням операційних витрат і збільшенням прибутковості операторів зв'язку.

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ PON

2.1 Відмінності між активними та пасивними оптичними мережами

Оптичні мережі відіграють важливу роль у передачі даних, забезпечуючи високу пропускну здатність і низьку затримку. Однак існує два основних типи оптичних мереж: активні та пасивні. Розглянемо ключові відмінності між цими двома підходами.

Активні оптичні мережі:

- Активні оптичні мережі використовують активне обладнання, як-от підсилювачі, для підтримання та посилення сигналу під час передавання даних. Основними елементами активних оптичних мереж є оптичні передавачі, підсилювачі та оптичні приймачі. Принцип роботи активних мереж заснований на тому, що сигнал постійно посилюється, щоб долати втрати сигналу в процесі передачі.
- Переваги активних оптичних мереж включають в себе більш довгі відстані передачі і більш високу пропускну здатність. Однак цей тип мережі вимагає постійного підтримання і заміни активних елементів, що може спричинити додаткові витрати на обслуговування та енергоспоживання.

Пасивні оптичні мережі (PON):

- На відміну від активних, пасивні оптичні мережі використовують пасивне обладнання для розподілу сигналу. Вони засновані на використанні розподілу сигналу між декількома абонентами без його посилення під час передачі. Основні компоненти пасивних оптичних мереж включають оптичний лінійний термінал (OLT), оптичний мережевий термінал (ONT) і розподільні вузли (ODN).
- Переваги пасивних оптичних мереж включають в себе більш низькі витрати на обслуговування і енергоспоживання, а також можливість обслуговування великої кількості абонентів одним оптоволоконним

кабелем. Однак, через пасивну структуру, довжини передачі можуть бути обмежені, і потрібне більш уважне планування з урахуванням втрат сигналу.

Порівняння:

- Витрати і обслуговування: Активні мережі зазвичай вимагають більш високих витрат на обслуговування через використання активних підсилювачів, в той час як пасивні мережі можуть бути більш економічно ефективними.
- Пропускна здатність: Активні мережі забезпечують вищу пропускну здатність, але пасивні мережі часто більш ніж достатні для більшості додатків.
- Довжина передавання: Активні мережі зазвичай підтримують довші відстані передавання, тоді як пасивні мережі можуть мати обмеження щодо цього.

Вибір між активними і пасивними оптичними мережами залежить від конкретних вимог проєкту, бюджетних обмежень і умов експлуатації. Кожен тип мережі має свої переваги та обмеження, і правильний вибір залежить від конкретних потреб конкретної інфраструктури передачі даних.

2.2 Переваги та недоліки

PON – це перспективна технологія, що стрімко розвивається і забезпечує широкосмуговий множинний доступ по оптичному волокну. Суть PON полягає у створенні повністю пасивної оптичної мережі з топологією дерева між центральним вузлом OLT і віддаленими абонентськими вузлами ONT. У проміжних вузлах дерева розміщуються пасивні оптичні розгалужувачі, відомі як сплітери. Ці компактні пристрої не потребують живлення та обслуговування. Один OLT може обслуговувати безліч ONT, і їхня кількість може бути вельми значною, що обмежується лише бюджетом потужності та максимальною швидкістю приймально–передавальної апаратури.

| Характеристика | Переваги | Недоліки |
|-------------------------|---|---|
| Пропускна здатність | Висока пропускна здатність, забезпечує передачу даних на високих швидкостях. | Обмежена дальність передачі сигналу в мережі PON з використанням звичайного одномодового оптичного волокна. |
| Відстань передачі | Незалежно від відстані передавання даних без використання активного обладнання. | |
| Витрати на обладнання | Нижчі витрати на обладнання і економія на енергоспоживанні. | Високі початкові інвестиції в інфраструктуру, особливо при розгортанні нових мереж. |
| Стійкість до перешкод | Низька чутливість до електромагнітних перешкод, безпека передачі даних. | У разі пошкодження оптичного волокна можуть виникнути серйозні проблеми в роботі мережі. |
| Простота обслуговування | Відсутність активних пристроїв у мережі, що зменшує складність обслуговування. | Виявлення та усунення несправностей вимагає високої кваліфікації та досвіду. |
| Енергоефективність | Менше енергоспоживання порівняно з активними оптичними мережами (FTTx). | У разі виходу з ладу обладнання, відновлення може бути складним і довгим. |

Таблиця 2.1 - Переваги та недоліки технології PON

2.3 Втрати під час використання оптоволоконного кабелю

Коефіцієнт загасання в оптичному волокні являє собою міру втрат світлової потужності волоконним матеріалом під час поширення світлових сигналів по волокну. Ці втрати можуть виникнути через різні фізичні процеси, як-от розсіювання світла, поглинання світла матеріалом волокна, а також вигини і дефекти в структурі волокна.

Коефіцієнт загасання вимірюється в децибелах на кілометр (дБ/км) і вказує, як швидко зменшується інтенсивність світла в міру його передачі через волокно. Що нижчий коефіцієнт загасання, то менші втрати світлової енергії, і, отже, волокно здатне передавати сигнали на довші відстані без істотних втрат якості сигналу. Зменшення коефіцієнта загасання є важливим фактором для підвищення ефективності та дальності передачі оптичних сигналів в оптичних волоконних мережах.

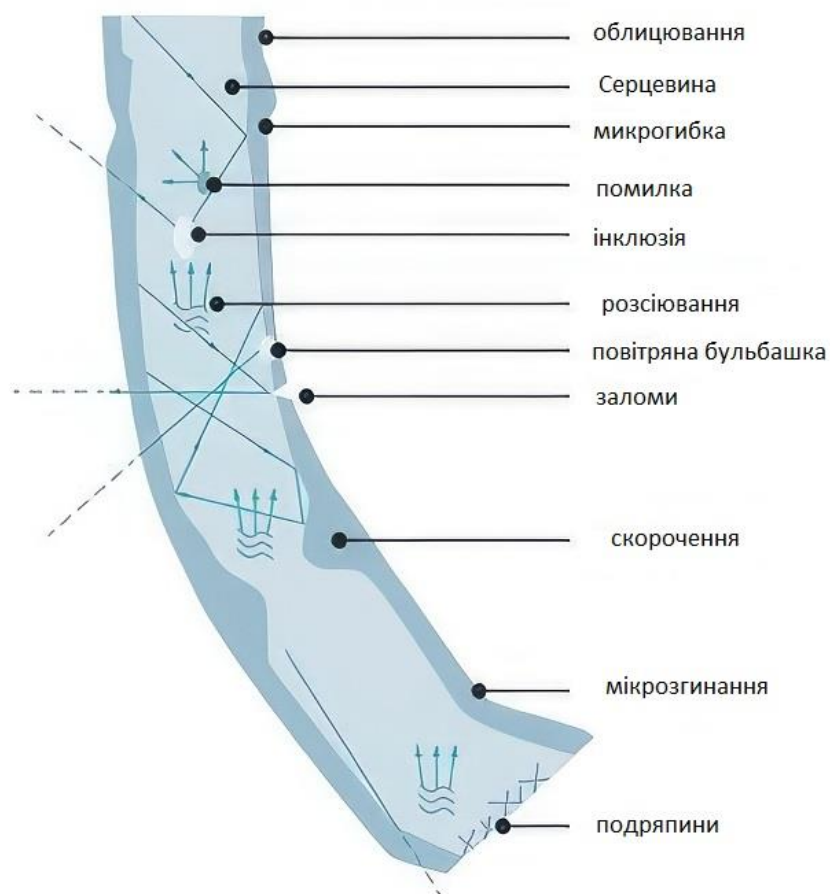


Рисунок 2.1 – Проблеми з оптичним кабелем

Внутрішні втрати і втрати при з'єднанні можуть виникнути при введенні світла в оптоволокно, як від джерела світла, так і при з'єднанні через роз'єми і зварні з'єднання по всій лінії передачі, аж до приймача. Існує безліч причин, що призводять до цих видів втрат, і часто вони пов'язані з різними аспектами. Наприклад, забруднення на торцевій поверхні роз'єму часто стають причиною таких втрат.

Також важливо зазначити, що з'єднання волокон різного діаметру на одній лінії також може призвести до втрат. Зварні з'єднання, реалізовані шляхом оплавлення, характеризуються дуже низьким загасанням, менше 0,1 дБ. Однак поздовжні, поперечні та кутові зміщення кінців волокна також можуть викликати загасання. Подряпини і відколи на торцевих поверхнях не тільки збільшують загасання, а й можуть призвести до додаткових пошкоджень на протилежній торцевій поверхні. Також помилка в процесі монтажу, наприклад, зовнішнє надрізання скловолокна, може викликати збільшення коефіцієнта загасання або навіть призвести до подальшого обриву.

У технічних характеристиках усіх оптоволоконних кабелів вказуються мінімальні радіуси вигину. Перевищення зазначених значень призводить до втрати світлової енергії та відповідного збільшення коефіцієнта загасання, оскільки частина світла з ядра волокна вибуває. Деякий час тому були розроблені волокна GOF для багатомодового і одномодового діапазонів, які мають високу гнучкість і можуть піддаватися сильним вигинам. Ці волокна, нечутливі до вигинів, дають змогу досягати радіусів вигину менше 10 мм. Ці волокна відповідають стандартам серії MEK 60793-x і мають міжнародні сертифікати ITU-Tx. Їхня перевага полягає в можливості використання в несприятливих умовах монтажу, включно з будівлями, житловими приміщеннями та промисловими об'єктами.

Оптоволоконні кабелі можуть піддаватися загасанню через матеріал, з якого їх виготовлено, і процес їхнього виробництва. Ці втрати можуть бути викликані різними факторами, включно з характеристиками матеріалу і можливими забрудненнями. Скловолокно, що використовується в кабелях,

оптимізовано для певних діапазонів довжини хвилі, і в цих діапазонах коефіцієнт загасання прагне бути мінімальним. Реальні значення коефіцієнтів загасання для конкретних довжин хвиль вказані в технічних описах.

Ці параметри мають значення під час експлуатації оптоволоконного кабелю, оскільки рівень загасання впливає на ефективність передавання світлового сигналу. Під час планування та встановлення мережі необхідно враховувати зазначені значення, щоб забезпечити оптимальну продуктивність і мінімізувати втрати в сигналі в міру його передавання кабелем.

2.4 Вплив розсіювання

Розсіювання в оптичному кабелі є одним із чинників, що впливають на світловий сигнал, переданий по волоконному кабелю. Розсіювання являє собою розсіювання світлових фотонів, викликане нерівностями в структурі волокна або іншими фізичними процесами.

Є кілька типів розсіювання, які можуть впливати на сигнал:

- Розсіювання Релея (Rayleigh Scattering): Це розсіювання відбувається через мікроскопічні нерівності в структурі скляного волокна. Воно впливає на світло з різними довжинами хвиль по-різному.
- Розсіювання Мі (Mie Scattering): Цей тип розсіювання пов'язаний з частинками у волоконному середовищі, такими як забруднення або дефекти. Воно може призвести до втрат енергії світлового сигналу.
- Розсіювання Маккабе (Macrobending Loss): Це розсіювання, викликане вигинами волоконного кабелю. За сильних вигинів світло може виходити з серцевини волокна, що призводить до втрат сигналу.

Всі ці форми розсіювання можуть впливати на інтенсивність світлового сигналу і, отже, на якість передавання даних оптичним кабелем. Для управління розсіюванням застосовують різні техніки, включно з оптимізацією конструкції волокна, застосуванням спеціальних покриттів і врахуванням оптимальних параметрів вигину кабелю під час монтажу.

На рисунку 2.2 представлено деформування сигналу під час проходження шляху від передавача до приймача

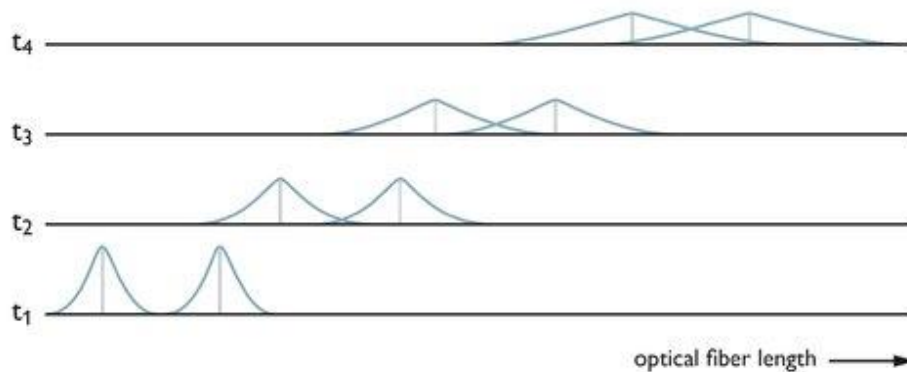


Рисунок 2.2 Деформування сигналу

2.5 Топології мережі

Розглядаючи різні структури мереж доступу, можна виокремити чотири основні архітектурні конфігурації: "кільцева", "радіальна" (або зоряна), "дерево" і "шина".

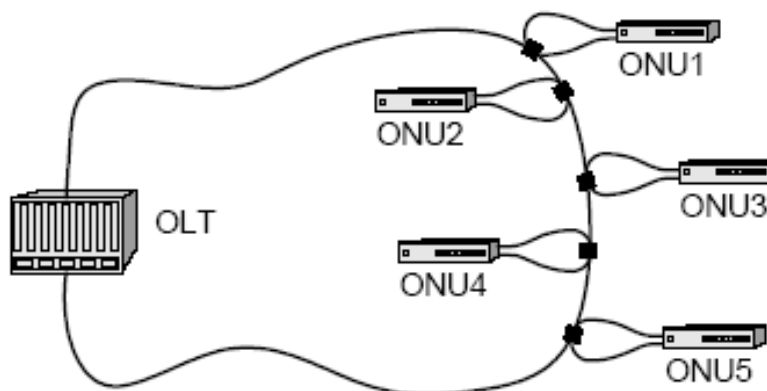
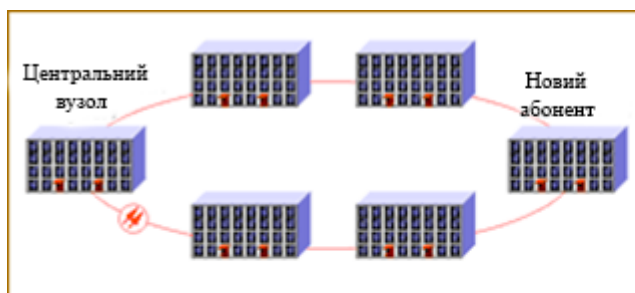


Рисунок 2.3– Кільцева топологія

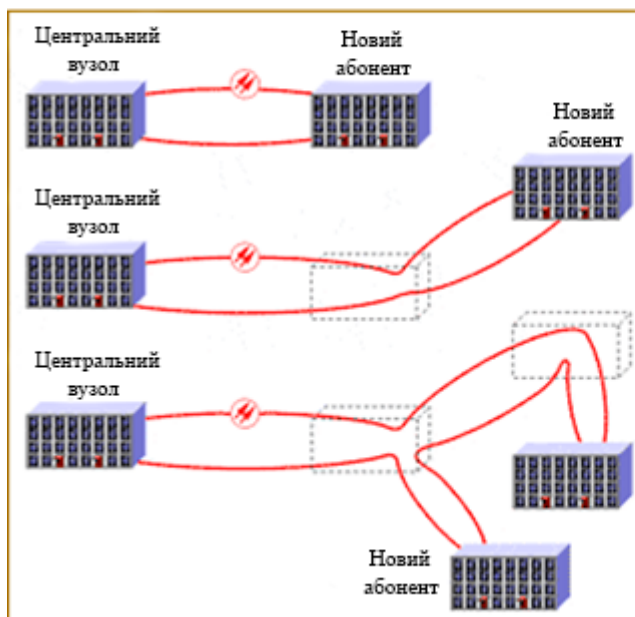
Кільцева топологія володіє високою вартістю обладнання і складним функціонуванням мережі, проте вона є ідеальним варіантом щодо кількості волокон і резервування.

Для ефективної роботи кільцевої топології в мережі доступу необхідно, щоб усі вузли кільця були під'єднані та функціонували. Однак на практиці підключення абонентів відбувається не одночасно. Розгортання всієї кільцевої мережі при підключенні обмеженого числа абонентів призводить до значних початкових витрат. Побудова абонентського оптичного вузла до укладення договору із замовником також є неоптимальною. Саме з цієї причини в реальному житті багато кільцевих топологій у мережах доступу або дуже компактні ("collapsed rings"), або витягнуті вздовж єдиного кабелю, як показано на рисунку 2.4.



Що бажає оператор:

- Багато абонентів на один центральний вузол
- Ефективне використання волокна
- Ефективний розподіл трафіку



Що буває на практиці:

- Абоненти замовляють послуги індивідуально, не за групами
- Додавання і видалення елементів з кільця впливає на якість послуг
- Щоденні замовлення на послуги часто перекривають інші чинники

Рисунок 2.4 - Схема побудови мережі доступу за технологією кільце

Приєднання нових абонентів до вже існуючого кільця здійснюється шляхом розірвання кільця і вставки додаткових сегментів. Обговорювати надійність підключення абонентів до такого кільця, перетвореного на ламану лінію, не зовсім доречно.

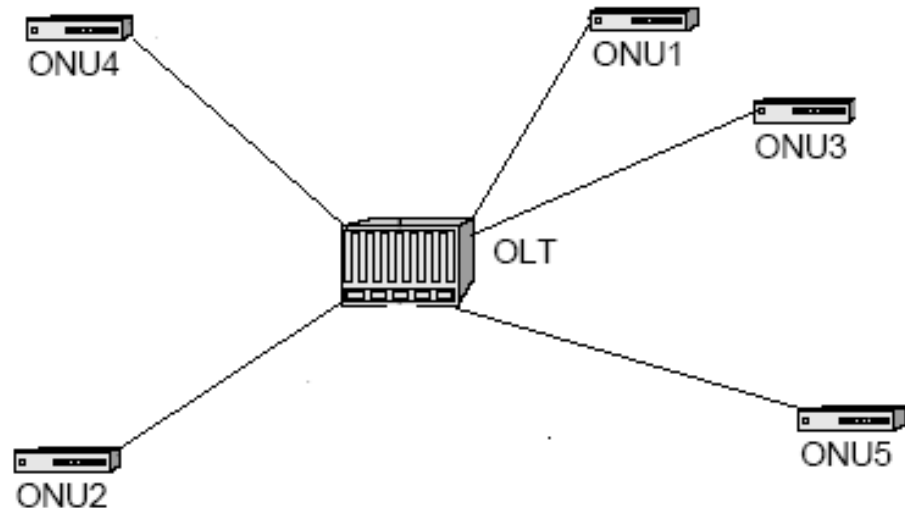


Рисунок 2.5 – Топологія "зірка"

Топологія "зірка" являє собою найбільш просту з погляду проектування та встановлення мережі. Це обумовлено тим, що мережева інфраструктура безпосередньо виходить з OLT і прямує до місця встановлення ONT. Слід зазначити, що перевагою цієї топології є її легкість в обслуговуванні. Також варто врахувати, що топологія "зірка" забезпечує зручність діагностики проблем і внесення змін до схеми розміщення.

Ще одним позитивним аспектом цієї топології є її здатність легко розширювати мережу шляхом додавання нових абонентів. У разі пошкодження однієї з ділянок мережевої інфраструктури, зачіпається тільки пристрій, підключений до цієї точки. Інша частина мережі продовжить роботу стабільно. З цих причин топологія "зірка" розглядається як найбільш надійна.

У певному сенсі, переваги топології "зірка" можуть бути розглянуті і як недоліки. Наприклад, використання окремого кабельного сегмента для кожного пристрою спрощує процес виявлення несправностей, однак це також

призводить до значного збільшення необхідного об'єму оптоволокна, що, в свою чергу, позначається на загальній вартості системи.

Шинна топологія, представлена на рисунку 2.12, виділяється своєю простою структурою кабельної системи з короткими відрізками кабелів, що робить її реалізацію відносно доступною порівняно з іншими топологіями. Проте основним недоліком цієї топології є складність діагностики помилок та ізоляції мережевих проблем через наявність декількох точок концентрації. Оскільки середовище передавання даних не проходить через вузли, під'єднані до мережі, вихід з ладу одного пристрою не впливає на функціонування інших.

Хоча використання всього одного кабелю можна вважати перевагою шинної топології, це компенсується тим, що кабель у цьому разі може стати критичною точкою відмови. Простіше кажучи, якщо шина переривається, то безліч абонентів позбавляються можливості отримувати послуги зв'язку.

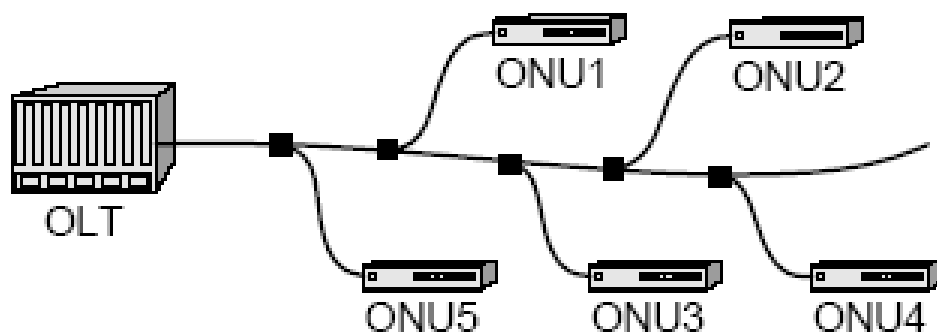


Рисунок 2.6 – Топологія шина

Топологія "дерево" (або ієрархічна топологія) являє собою структуру мережі, що будується на основі ієрархії та має форму дерева. Ця топологія об'єднує в собі переваги як шинної, так і зіркової топології, що робить її широко використовуваною в різних типах мереж.

Основні риси топології "дерево":

- Ієрархія: Мережа організована у вигляді ієрархії, де кожен рівень має свою специфічну функцію. Зазвичай існує центральний вузол

(зазвичай кореневий вузол), який з'єднується з підлеглими вузлами на нижчих рівнях ієрархії.

- Ефективність і масштабованість: Топологія "дерево" забезпечує ефективне управління мережею і легкість масштабування. Додавання нових вузлів і розширення мережі не вимагає перебудови всієї системи, а лише розширення відповідного рівня ієрархії.
- Надійність: У разі виходу з ладу одного з підлеглих вузлів, це не впливає на роботу інших гілок дерева. Крім того, завдяки ієрархічній структурі, вузол на вершині дерева (кореневий вузол) може виконувати функції резервного джерела даних або контролю.
- Легкість обслуговування та діагностики: Через структуру "дерева" легко виявляти та ізолювати проблеми в мережі. Обслуговування стає простішим, оскільки мережа розділена на логічні сегменти.
- Змішані топології: Топологія "дерево" дає змогу комбінувати різні топології залежно від вимог кожного конкретного рівня в ієрархії. Наприклад, на одному рівні може використовуватися зіркова топологія, а на іншому – кільцева.

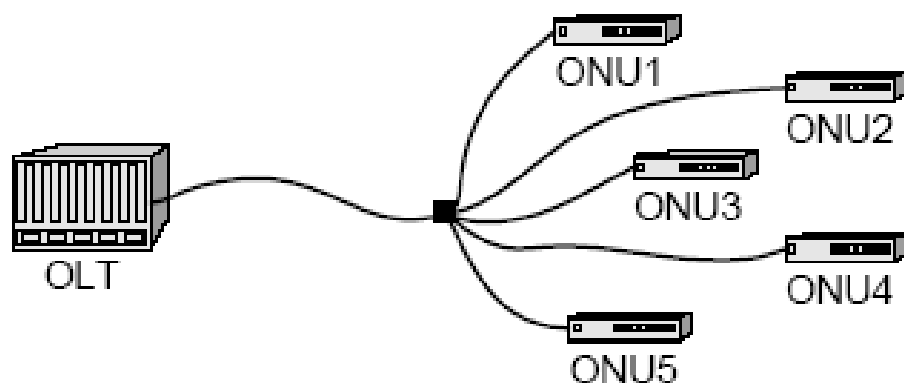


Рисунок 2.7 – Топологія "дерево"

Однак, варто зазначити, що топологія "дерево" не позбавлена недоліків. Вона вимагає ретельного планування і може стати складною в реалізації в разі невдалого проектування. Проте, завдяки своїй гнучкості та ефективності, вона

широко застосовується в сучасних мережах, особливо в корпоративних і телекомунікаційних інфраструктурах.

2.6 Вимоги та основні принципи побудови PON

Структура мережі на основі технології PON є трьома ключовими компонентами, як відображено на рисунку 2.8:

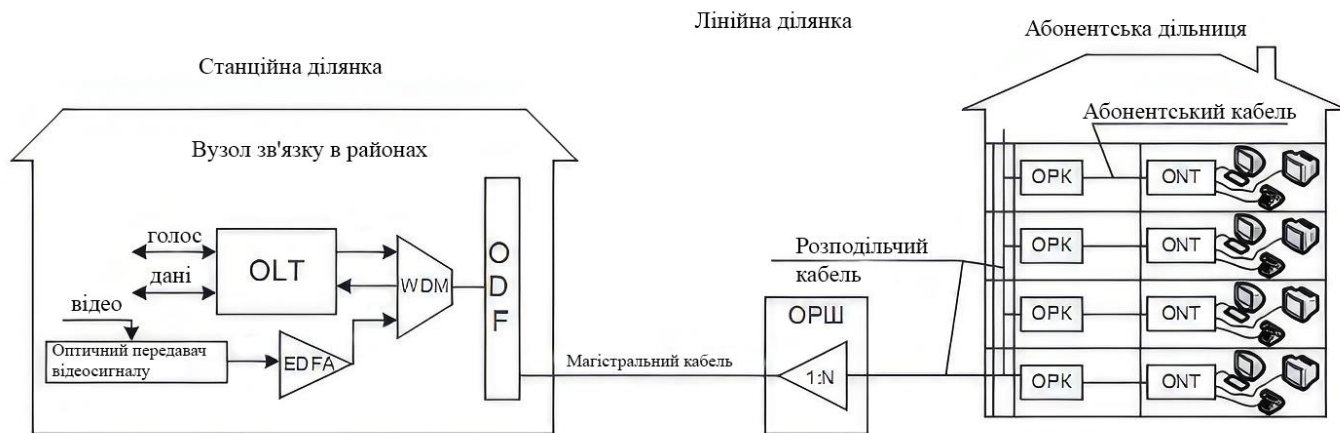


Рисунок 2.8 – Основні ділянки мережі PON та їхні компоненти

Станційний сегмент: Цей сегмент містить активне обладнання, таке як OLT (оптичний лінійний термінал), WDM мультиплексор і високощільний оптичний крос. Ці компоненти зазвичай розміщують у спеціальних приміщеннях, які називаються центральними вузлами зв'язку або комутаційними центрами. Ці приміщення можуть бути частиною центрального офісу провайдера зв'язку або окремими спорудами. Дивитися де зазвичай розміщують обладнання у примітці А.

Лінійний сегмент: Включає в себе оптичні кабелі, шафи, коробки, сплітери, конектори та інше обладнання, розміщене між станційним і абонентським сегментом. Це охоплює ділянку між ODF і ОРК.

Абонентський сегмент: Цей сегмент охоплює індивідуальні оптичні волоконні кабелі (найчастіше одноволоконні, рідше дво- або чотирихволоконні) від загальних розподільчих пристроїв до оптичних розеток і активного обладнання ONT в абонентській квартирі. Може також простягатися до групового мережевого вузла ONU, встановленого в офісі корпоративного клієнта. Ця ділянка охоплює зону між ОРК і ONT, як показано на схемі 2.8.

2.6.1 Станційна ділянка

У разі, якщо ОРК не використовуються (наприклад, в одноповерхових будівлях, де використовується тільки ОРШ), лінійні та абонентські ділянки обмежуються з'єднаннями ODF – ОРШ і ОРШ – ONT відповідно.

OLT розміщується в приміщенні вузла зв'язку районів, що обслуговуються мережею PON, де район обслуговування визначає зону охоплення. Активне станційне обладнання PON, OLT в даному випадку, з'єднує кінцеве обладнання абонентів з мережею Інтернет та іншими джерелами послуг.

Лінійні порти PON обладнання OLT підключаються до оптичного кросу високої щільності ODF за допомогою оптичних шнурів (патч-кордів) або окінцьованих мікрокабелів (що надаються виробниками у вигляді замовних наборів ОВК).

Оптичний крос ODF призначений для розподілу ОВК у потрібні напрямки, перемикання (комутації) і з'єднання зі станційним ОВК через сплайс-пластини (касети і бокси для зварних з'єднань).

У разі використання двокаскадної схеми розміщення спліттерів на PON, перший каскад з низьким коефіцієнтом розгалуження (1:2, 1:4) слід встановлювати прямо в ODF.

Оптичний крос повинен розташовуватися в тому ж приміщенні вузла зв'язку районів, де встановлена стійка з OLT.

Рекомендується застосовувати оптичний крос ODF модульного типу з можливістю розширення його ємності в разі збільшення кількості абонентів.

2.6.2 Лінійна ділянка

Побудова лінійної ділянки, на якій потрібно виконати різноманітні складні будівельно–монтажні роботи для встановлення великого пасивного обладнання, вимагає особливої уваги з метою досягнення оптимальних результатів. Рекомендується застосовувати технології та методи, спрямовані на мінімізацію трудовитрат і часу будівництва, а також на зменшення вартості використовуваного обладнання для монтажу. Лінійна ділянка визначає остаточну топологію мережі PON.

У мережі PON зв'язок від ОРШ до кінцевих пристроїв абонентів (ONT, ONU) здійснюється через пасивні оптичні розгалужувачі (спліттери), що розміщуються в оптичних розподільчих коробках (ОРК) та/або оптичних розподільчих шафах (ОРШ), іноді – в механічних оптичних муфтах.

Мережа може використовувати як однорівневу (однокаскадну) схему ввімкнення спліттерів, де вони не послідовно з'єднані один з одним, так і багатокаскадну схему з послідовним розміщенням спліттерів (рисунок 2.9).

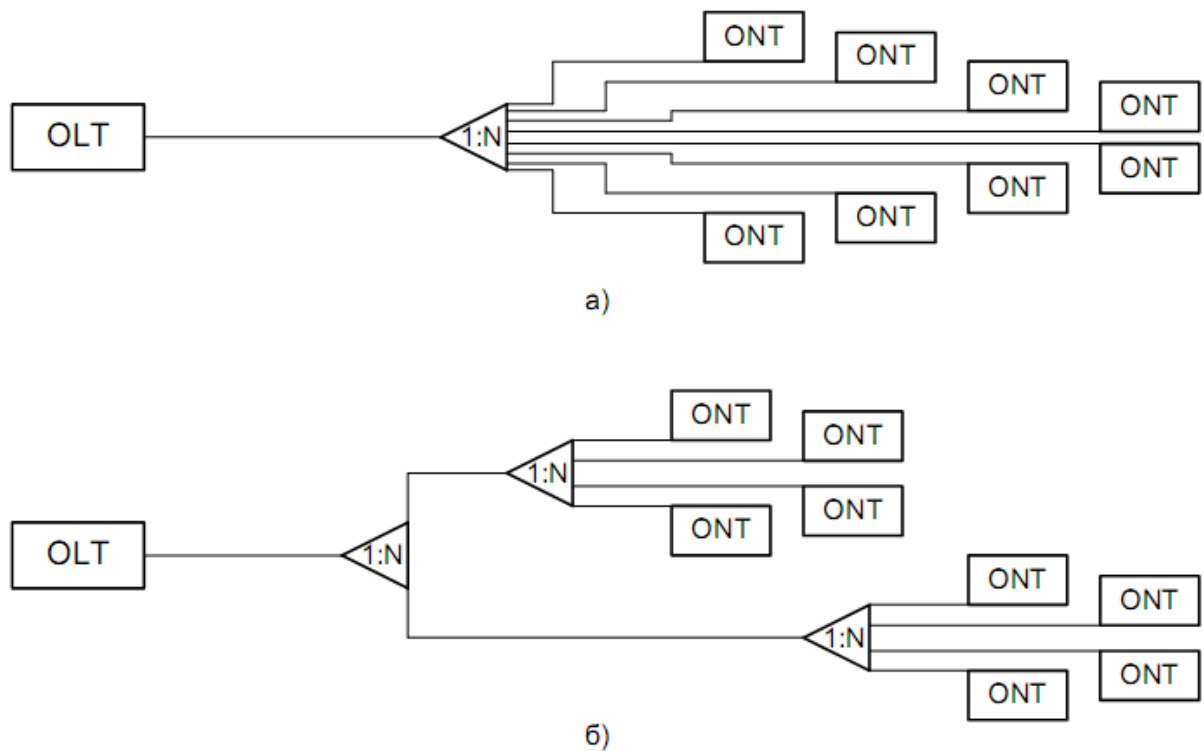


Рисунок 2.9 – Схема ввімкнення спліттерів

- а) однорівнева схема включення спліттерів;
- б) багаторівнева схема ввімкнення спліттерів;

Кількість рівнів каскадування залежить від сумарного загасання спліттерів, коефіцієнта розгалуження PON інтерфейсів OLT (у GPON це 1:64) і вимог до смуги пропускання для кожного абонента. Зменшення кількості рівнів каскадування спліттерів полегшує мережу абонентського доступу, що сприяє більш швидкому усуненню несправностей і підвищенню якості зв'язку завдяки зменшенню можливих спотворень на багатоступеневій передачі сигналів.

Використання багатокаскадної схеми з послідовним розміщенням в архітектурі мережі забезпечує гнучкість у розташуванні розподільчих пристроїв і ОВК, що дає змогу оптимально побудувати мережу PON.

Лінійна ділянка включає в себе:

- магістральну ділянку – це ОВК, що прокладається в каналах кабельної каналізації або в ґрунті від кросу ODF на АТС у напрямку території з великою групою будівель (район, квартал), що завершується ОРШ;
- розподільча ділянка – це ОВК, що прокладається від ОРШ до ОРК переважно всередині будівель по вертикальних стояках.
- Магістральна ділянка в мережі PON являє собою один з ключових компонентів всієї пасивної оптичної інфраструктури. Професійний вибір системи побудови мережі та її топології, а також визначення умов і принципів організації доступу, відіграють важливу роль в оптимізації витрат на майбутній розвиток мережі.

На ділянці мережі PON від ВЗВР до оптичної розподільчої шафи (ОРШ), що знаходиться в зоні обслуговування ВЗВР, проводиться магістральний розподіл оптичних волокон.

Основне завдання магістральної ділянки полягає в тому, щоб підвести необхідну кількість оптичних волокон якомога ближче до згрупованої групи абонентів, з огляду на топологію і ємність кабельної каналізації.

На абонентському закінченні магістралі завжди встановлюється ОРШ, ОРК або спеціальна механічна оптоволоконна муфта з полегшеним доступом до оптичних волокон.

Для мінімізації оптичного бюджету магістральної ділянки на зварюваннях оптичних волокон і скорочення вартості будівельно–монтажних робіт рекомендується використовувати відповідний модульний ВОК для каналізації або прокладання в ґрунт з використанням методів прокладання на довжині до 2 км. Не рекомендується укладання оптичних волокон у прутковій броні (для прокладання в ґрунт) у кабельну каналізацію і по будівлях.

Залежно від віддаленості будівель, що підключаються до магістралі, кількості потенційних абонентів, типу будови (висотна або низька), особливостей міської забудови (житлові квартали, історичний центр, офіси, промзона) та можливостей прокладання оптичних волокон територією і

розміщення обладнання в цих будівлях, виділяють два види магістральної ділянки:

- зона прямого живлення;
- шафовий район.

Зона прямого живлення являє собою територію навколо ВЗВР у радіусі до двох кілометрів із щільною висотною забудовою, де інфраструктура телефонної каналізації добре розвинена, і немає гострої нестачі вільних кабельних каналів між будинками.

У зоні прямого живлення слід використовувати ВОК високої і середньої ємності (не менше 32 і не більше 64 оптичних волокон), що володіє модульною структурою.

Кабель на 64 оптичних волокна, що складається з восьми модулів по вісім оптичних волокон, дає змогу під'єднати до однієї магістралі вісім сусідніх будівель, використовуючи послідовність муфт із відгалуженням по одному модулю на будівлю без розрізання транзитних модулів. Цей метод прокладки дає змогу істотно оптимізувати як оптичний бюджет лінії, так і загальну вартість зварювальних робіт, шляхом виключення складного горизонтального розподілу з послідовним зменшенням ємності від муфти до муфти.

Рекомендується уникати складного горизонтального розподілу, надаючи (або резервуючи на майбутнє) безпосередньо від магістралі щонайменше чотири оптичних волокна в кожному будівлю з числом квартир до 60, вісім оптичних волокон з числом квартир від 60 до 120 та 16 оптичних волокон для будівель із понад 120 квартирами. Загальний принцип визначення необхідної кількості оптичних волокон на одну будівлю – два оптичних волокна на кожні 30–35 квартир (одне в навантаженні, інше в резерві). За наявності офісного приміщення з окремим входом у житловому будинку воно розглядається як одна квартира. Однак загальна кількість оптичних волокон, запланована для кожної конкретної будівлі, має бути розрахована з

урахуванням передбачуваного відсотка абонентів, підключених за технологією PON, від загальної кількості абонентів.

Загальний принцип розрахунку необхідних оптичних волокон представлений для випадку використання розгалужувачів мережі PON з максимальним поділом на 32.

У межах усієї зони прямого живлення ділянки магістралі підключаються до ОРШ, встановлених на внутрішній стіні будівлі в цокольному поверсі в середній частині будівлі (іноді на зовнішній стіні) або в спеціальних сплітерних коробках, встановлених на першому (рідко на другому) поверсі кожного під'їзду.

Параметри і компоненти ОРШ мають бути розраховані за ємністю з урахуванням загальної кількості квартир у будинку і встановлення в ньому необхідної кількості спліттерів.

Шафовий район являє собою територію з розрідженою та/або низькою забудовою, таку як індивідуальна забудова, віддалена від ВЗРВ на відстані двох кілометрів і більше. У цій зоні спостерігається гострий дефіцит вільних кабельних каналів на великих відстанях.

Для з'єднання від ВЗРВ до групи шаф слід використовувати ВОК середньої або малої ємності (від 16 до 48 оптичних волокон), що має модульну структуру.

Подібно до зони прямого живлення, кабель на 48 оптичних волокон, що складається з чотирьох модулів по 12 оптичних волокон, дає змогу під'єднати до однієї магістралі чотири вуличних оптичних розподільчих шафи, використовуючи муфти з відгалуженням одного модуля на кожен шафу без розрізання транзитних модулів.

Усі аспекти, що стосуються зони прямого живлення, також застосовні до шафових районів. Відмінність полягає в тому, що замість будівель до магістралі підключаються проміжні вуличні оптичні розподільчі шафи, які об'єднують в собі кілька будівель.

З урахуванням типорозмірів ВОК, оптимальна ємність оптичних розподільчих шаф перебуває в межах до 580 абонентських підключень. При цьому необхідно враховувати складність монтажу, габарити і трудовитрати на обслуговування шаф великої ємності.

За ємності оптичних розподільчих шаф у 480 абонентів слід підводити 24 оптичних волокна (16 оптичних волокон у навантаженні плюс вісім оптичних волокон у резерві). При цьому рекомендується використовувати стандартні шафи однакової ємності в рамках всієї міської мережі PON.

Загальна кількість оптичних волокон для під'єднання абонентів у даному районі має бути розрахована з урахуванням планованого відсотка абонентів мережі PON від загального числа абонентів.

Розподільча ділянка в мережі PON являє собою ділянку від оптичної розподільчої шафи (ОРШ) або під'їзного оптичного розподільчого короба (ОРК) до поверхових розподільчих елементів у багатоповерхових житлових будинках.

Оптичний ВОК, що виходить з ОРШ, пролягає всередині будівель по вертикальних стояках або в металевій трубі (полівінілхлоридній трубі) у сходових клітках, від підвального до горищного приміщення через усі поверхи будівлі (напрямок вибирається за місцем).

На розподільчу ділянку впливають:

- ділянка мережі від вуличного ОРШ до кабельного вводу в житловий будинок;
- розподільні пристрої безпосередньо в житловому будинку.

Під час проектування вертикальної розподільчої ділянки будівлі керуються такими принципами:

- простота підключення;
- максимальна оперативність підключення квартири абонента до вертикального розподілу (у разі виникнення заявки);
- мінімальна вартість кабельних виробів і матеріалів.

Основний метод горизонтальних відгалужень від міжповерхового вертикального ОВК являє собою класичну схему з ОРК, розміщеними на кожному поверсі.

Під час монтажу вертикальної розподільчої ділянки в будівлі враховуються характеристики будівлі, такі як:

- кількість квартир на поверсі;
- доступність слабкострумових ніш і наявність вільного простору в них;
- можливість прокладання ОВК у вертикальних каналах будівлі.

Якщо в під'їзді передбачено два і більше вертикальних стояки, вибирають тільки один, найменш завантажений.

У разі неможливості прокладання ОВК у єдиному наявному стояку розглядають укладання ОВК у металеву трубу або полівінілхлоридну трубу вздовж стін сходових кліток (застосовують кабель із малим радіусом вигину до 5 мм).

Під час проектування розподільчої ділянки в будинку враховується ємність вертикального ОВК з урахуванням 100 % підключення абонентів. Використовується ОВК з ємністю, яка найкращим чином відповідає кількості квартир у під'їзді з урахуванням запасу оптичних волокон. На кожному поверсі передбачається необхідна кількість відгалужень, достатня для підключення всіх квартир.

Підключення ОВК вертикальної розподільчої ділянки в будівлі здійснюється через патч-панель до роз'ємів спліттерів в ОРШ або під'їзному ОРК без проміжних муфт і переходів на інший тип ОВК.

У разі розміщення ОРК осторонь від ОВК вертикальної прокладки, з ВОК виводиться відповідний модуль, який поміщається в захисну трубку. На місці відгалуження встановлюється поверховий відгалужувач.

2.6.3 Абонентська діляниця

Абонентська ділянка, також відома як абонентська розводка, є сегментом мережі, що починається від поверхової оптичної розподільчої коробки (ОРК) і тягнеться до приміщення абонента, включно з оптичною розеткою. До складу абонентської ділянки також входить активне обладнання на стороні абонента (ONT, ONU), що є невід'ємною частиною технології PON, яке перебуває під управлінням оператора. Оператор несе відповідальність за внутрішні вихідні інтерфейси пристрою або системи управління пристрою в разі підтримки функцій роздільного доступу до користувацьких і операторських налаштувань. Абоненту не надається можливість застосування довільно обраного ONT або ONU.

Індивідуальний абонентський термінал ONT або груповий мережевий вузол ONU містять вхідний оптичний інтерфейс PON. ONT/ONU можуть бути оснащені різними вихідними інтерфейсами FXS, FXO, 10/100/1000Base-T, E1, RF, у різних комбінаціях і кількості для під'єднання різних кінцевих пристроїв.

Спосіб прокладання оптичного волокна в квартиру передбачає:

- мінімальний час перебування монтажників у квартирі;
- розміщення індивідуального пристрою ONT поруч з оптичною та електричною розетками;
- можливість прокладання кабелів крученої пари всередині приміщення до кінцевих пристроїв, як-от комп'ютери та телевізори (з узгодженням з абонентом).

схему, засновану на обміні повідомленнями Grant і Request. ONU надсилає запити (Requests), повідомляючи про зміну стану, наприклад, обсягу буферизованих даних. OLT обробляє всі запити і присвоює різні тимчасові домени для ONU. Повідомлення про присвоєння доменів доставляються ONU за допомогою повідомлень Grant.

Перевага централізованого ухвалення рішень про присвоєння тимчасових доменів полягає в тому, що OLT знає стан всієї мережі і може

переключитися на інший алгоритм за необхідності, не вимагаючи від ONU моніторингу стану мережі або узгодження параметрів. Це робить ONU простішими і дешевшими, а мережу загалом надійнішою.

3 ПОРІВНЯННЯ GPON З КОНКУРУЮЧИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

3.1 Основні відомості про EPON

EPON (Ethernet Passive Optical Network) - це технологія, яка використовується для надання широкосмугового доступу в мережах зв'язку. Вона об'єднує методи Ethernet і пасивного оптичного мережевого доступу, що дає змогу забезпечити високошвидкісне підключення до інтернету та інші послуги зв'язку.

Ця технологія, була однією з перших впроваджуваних в Україні у сфері оптичних мереж. Перші проєкти з впровадження EPON в Україні можна віднести до 2010-2011 років.

EPON працює на основі стандарту IEEE 802.3ah і використовує точково-багатоточкову топологію. У такій конфігурації один оптичний лінійний термінал (OLT), встановлений провайдером, підключається до безлічі оптичних мережевих пристроїв (ONU або ONT), розташованих у кінцевих користувачів, через комутатори.

Стандартні швидкості передачі даних у мережах EPON становлять 1 Гбіт/с як для висхідного, так і для низхідного каналів. Однак розвиток технології дозволив створити розширення, які збільшують ці швидкості до 10 Гбіт/с і вище. Для низхідного каналу використовується довжина хвилі 1490 нм, а для висхідного - 1310 нм. Це дає змогу уникнути взаємних перешкод між каналами та забезпечує високу ефективність передавання даних.

Стандарт EPON дещо відрізняється від Ethernet структурою кадру, тому "не-EPON" пристрої в мережі PON працювати не будуть. До речі, до прийнятого стандарту IEEE 802.3ah майже ніхто з виробників не відповідає йому повною мірою. В силу цього, відсутня повна крос-платформна сумісність обладнання (наприклад, OLT від ZYXEL не буде працювати з ONU від HUAWEI, або OLT від HUAWEI не буде розкривати весь свій потенціал при роботі з ONU від BDCOM).

| Параметр | Специфікації |
|----------------------------|---|
| Швидкість доступу до даних | Висхідний потік 1,25 Гбіт/с; Низхідний потік 1,25 Гбіт/с. |
| Довжини хвиль | 1490 нм (вниз за течією), 1310 нм (вгору за течією) |
| Дистанція | До 20 км між центральним обладнанням і абонентським пристроєм, але може вимагати підсилювачів сигналу на великих відстанях. |
| Кількість поділів | Макимум 64 |

Таблиця 3.1 - специфікації EPON

Стандартні Ethernet кадри в PON трохи модифікуються під специфіку роботи в розділюваному за принципом TDM середовищі, однак OLT модифікує вихідні пакети так, що на виході з PON виходить стандартний Ethernet потік. У зворотному напрямку ситуація аналогічна. Структура стандартного Ethernet кадру (IEEE 802.3), PON кадру (IEEE P802.3ah) і керуючого кадру IEEE P802.3ah наведена нижче (Рисунок 3.1):

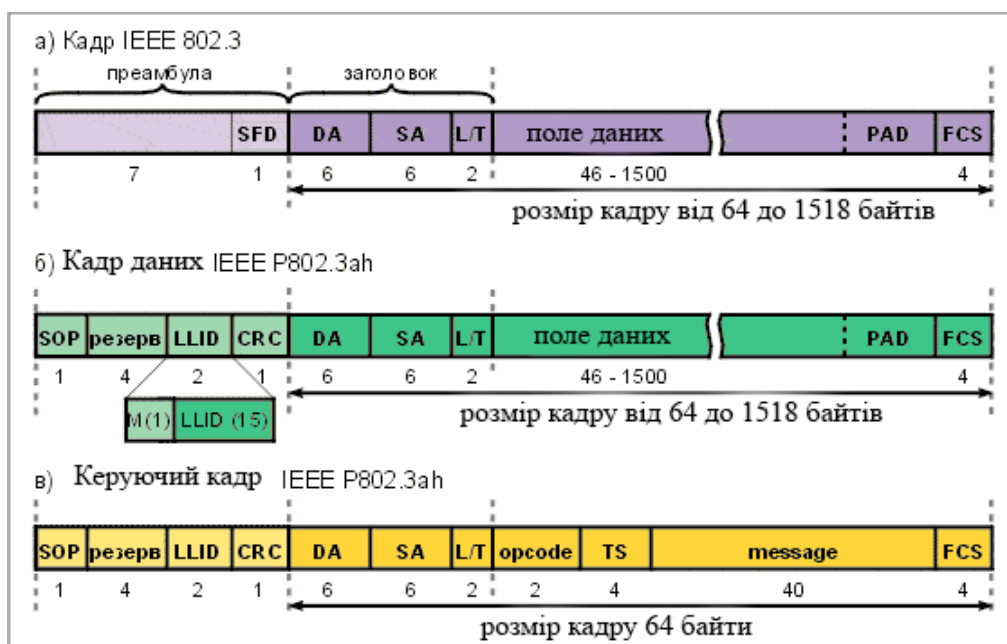


Рисунок 3.1 - Порівняння полів кадрів IEEE 802.3 і IEEE P802.3ah

- SOP (start of packet) – поле розміром 1 байт, що позначає початок кадру;
- Резервне поле розміром 4 байти;
- LLID (logical link identifier) – поле розміром 2 байти, що вказує індивідуальний ідентифікатор вузла GPON. LLID необхідний для емуляції з'єднань "точка–точка" і "точка–многоточка" в мережі GPON. Перший біт поля вказує на режим мовлення кадру ("unicast" або "multicast"). Решта 15 біт містять власне індивідуальну адресу вузла GPON;
- CRC (circle redundancy check) – поле розміром 1 байт, що являє собою контрольну суму для преамбули.

Практично можна стверджувати, що під час проходження кадру через мережу EPON йому присвоюється EPON–мітка. При виході кадру з мережі GPON преамбула повертається до стандартного вигляду, і мітка усувається. OLT змінює преамбулу кожного вихідного кадру, що спрямовується в дерево PON, додаючи в неї спеціальний тег LLID. Цей тег витягується відповідним підрівнем ONT, де відбувається відновлення преамбули. У нормальному режимі роботи вузол ONT обробляє тільки ті кадри, у преамбулі яких ідентифікатор LLID збігається з власним LLID.

Решта полів кадру EPON збігаються з полями стандартного кадру Ethernet:

- DA (destination address) – поле 6 байт, що містить MAC–адресу станції призначення. Це може бути унікальна фізична адреса (unicast), групова адреса (multicast) або ширококомовна адреса (broadcast);
- SA (source address) – поле 6 байт, що вказує MAC–адресу станції–відправника;
- L/T (length/type) – поле 2 байти, що містить інформацію про довжину або тип кадру;
- Поле даних змінної довжини;

- Pad (наповнювач) – поле використовується для доповнення кадру до мінімального розміру;
- FCS (frame check sequence) – поле 4 байти, що являє собою контрольну послідовність кадру, де вказується контрольна сума, обчислена з використанням циклічного надлишкового коду.

У середині мережі EPON, поряд із даними, передаються службові кадри (повідомлення), усі вони мають фіксовану довжину в 64 байти. Преамбула та адресні поля керуючого кадру і кадру даних EPON ідентичні. Решта полів керуючого кадру несуть таку інформацію:

- L/T – поле 2 байти; для керуючого кадру це поле містить значення 0x8809, що є ідентифікатором керуючого кадру порівняно з даними кадрами;
- Opcode (optional code) – поле 2 байти, що уточнює тип керуючого кадру. Існує дві категорії керуючих кадрів: повідомлення GATE, що випускаються OLT, і повідомлення REPORT, що випускаються ONT;
- TS (time stamp) – поле 4 байти, що містить тимчасову мітку відправника;
- Message – поле 40 байт, що містить службову інформацію, необхідну для роботи протоколу MPCP.

3.2 Основні відомості про GPON

Наразі найпоширеніший стандарт PON заснований на базі G-PON, яка відома як G-PON Service Requirements (GSR) і узагальнює експлуатаційні характеристики, які постачальники послуг очікують від мережі.

Технологія GPON почала активно впроваджуватися ближче до середини 2010-х. GPON запропонувала більш високі швидкості і кращу масштабованість порівняно з EPON, що зробило її кращою для багатьох операторів зв'язку. Перші великі проєкти GPON в Україні почалися приблизно

в 2014-2016 роках. У таблиці 3.2 наведено основні характеристики GPON, засновані на GSR.

| Параметр | GSR специфікації |
|----------------------------|--|
| Швидкість доступу до даних | Низхідний потік: 1,244 і 2,488 Гбіт/с Висхідний потік: 155 Мбіт/с, 622 Мбіт/с, 1,244 Гбіт/с, 2,488 Гбіт/с |
| Довжини хвиль | Подальша передача голосу/даних: 1480-1550 нм Довжини хвиль Висхідний голос/дані: від 1260 до 1360 мкм Розподіл відео: 1550-1560 нм |
| Дистанція | 10 або 20 км максимум |
| Кількість поділів | Максимум 128 |

Таблиця 3.2 - специфікації GPON

GPON – це оптична мережа, побудована на технології точка–мультиточка (PtMP), де немає активних пристроїв на шляху передавання даних від відправника до одержувача. Основними компонентами GPON є пасивні оптичні елементи, такі як оптичні волокна, роз'єми та розгалужувачі. Ця архітектура спроектована з метою мінімізації витрат, зменшуючи кількість оптичних трансиверів, терміналів управління та довжину оптичних волокон.

Основна взаємодія в GPON відбувається між центральним вузлом передачі даних (OLT) та оптичними мережевими пристроями абонента (ONU). ONU може функціонувати як для індивідуального клієнта (fiber-to-the-home), так і для кількох клієнтів. У напрямку downstream, GPON працює як широкомовне середовище; пакети Ethernet передаються від OLT через пасивні розгалужувачі 1:N або каскад розгалужувачів, досягаючи ONU. ONU відбирає тільки ті пакети, які адресовані його користувачам, відхиляючи всі інші.

У процесі передачі даних вниз (від центрального вузла до абонента), кадри Ethernet направляються від OLT до ONU через 1:N пасивні

розгалужувачі, де N зазвичай знаходиться в діапазоні від 4 до 64. Оскільки Ethernet за своєю природою є ширококомовним, у цьому напрямі PON ідеально підходить: пакети ширококомовно передаються OLT і приймаються ONU, досягаючи свого адресата згідно з MAC-адресою, як показано на рисунку 3.1.

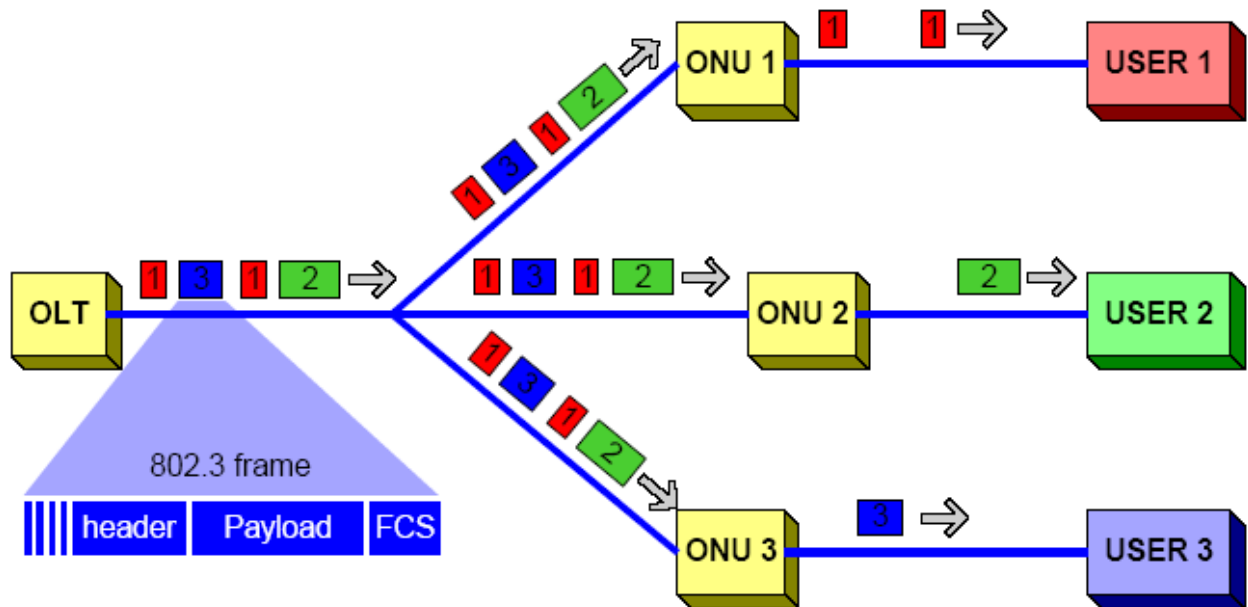


Рисунок 3.2 – Транспорт трафіку в напрямку downstream

У процесі передачі даних вгору, який представлений на рисунку 3.2, через спрямованість пасивного оптичного об'єднувача, інформаційні кадри від кожного ONU досягають OLT, а не інших ONU. Проте, на відміну від мереж точка–точка, в GPON інформаційні кадри від різних ONU, що передаються одночасно, можуть стикатися, тому для запобігання можливих зіткнень потрібен механізм арбітражу в upstream–напрямку.

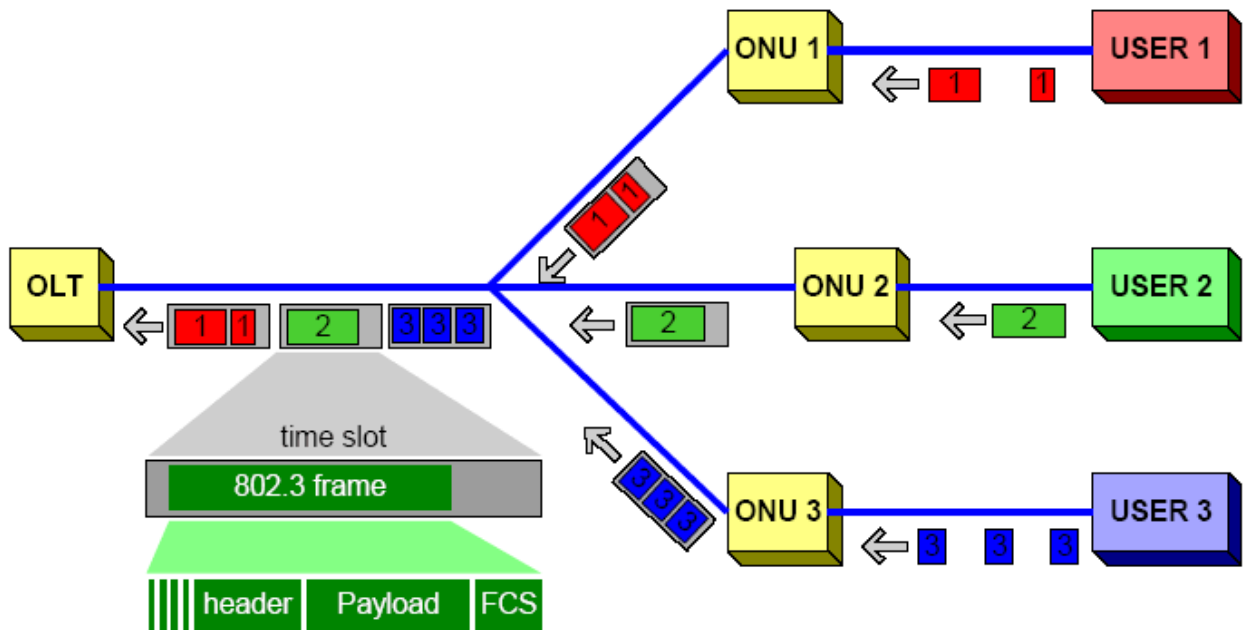


Рисунок 3.3 – Транспорт трафіку в напрямку upstream

Реалізація механізму конкуренції під час доступу до мережевого середовища, подібного до CSMA/CD, являє собою складне завдання через те, що ONU не може виявляти зіткнення в OLT через спрямованість оптичних розгалужувачів/змішувачів. OLT здатний виявляти зіткнення та інформувати ONU через передачу сигналу jam. Однак затримки поширення в PON, де довжини каналів можуть перевищувати 20 км, можуть істотно знизити ефективність такої схеми. Схеми арбітражу також стикаються з недоліком невизначеності в забезпеченні послуги, що означає, що пропускна здатність і використання каналу можуть бути визначені лише статистичними середніми параметрами. Немає гарантії, що вузол отримає доступ до мережевого середовища протягом короткого часового інтервалу. Це не становить серйозної проблеми для корпоративних мереж, заснованих на алгоритмі CSMA/CD, де відстані невеликі. Однак для мереж доступу клієнтів, де крім даних передаються голос і відео, що вимагає суворих обмежень на затримки доставки, це стає значущою проблемою.

Усі Оптичні Мережеві Пристрої (ONU) синхронізуються від спільного джерела часу, і кожній ONU призначається певний часовий домен. Кожен

домен може використовуватися для передачі декількох кадрів Ethernet. ONU зобов'язаний буферизувати отримані від клієнта кадри до моменту надходження його тимчасового домену. У разі настання його тимчасового домену ONU передає всі кадри, що перебувають у буфері, з максимальною каналною швидкістю, що відповідає стандартам Ethernet (10/100/1000/10000 Мбіт/с). Якщо в буфері немає кадрів, щоб заповнити весь домен, передаються порожні 10-бітові символи. Існують різні схеми виділення тимчасових доменів, від статичних TDMA до динамічних, що враховують поточний розмір черги в кожній ONU (схема статистичного мультиплексування). Також можливі схеми, що враховують пріоритет трафіку, якість обслуговування QoS, угоди про рівні обслуговування SLA тощо.

Децентралізована схема динамічного надання тимчасових доменів можлива, де ONU вирішують, коли надсилати дані і як довго це має тривати. Ці схеми нагадують маркерний підхід, за винятком використання пасивного кільця. У такій схемі кожна ONU перед відправленням даних надсилає спеціальне повідомлення про кількість байт, які потрібно передати. ONU, якій слід передавати наступною (наприклад, за карусельного алгоритму), моніторить передачу попередньої ONU і починає передачу так, щоб кадр прийшов до OLT одразу після завершення передачі попередньої ONU. Таким чином, запобігають зіткненням і втратам смуги пропускання. Однак ця схема має обмеження: потрібен зв'язок між ONU, що обмежує топологію PON, вимагаючи виконання мережі у вигляді кільця або ширококомовної зірки.

В оптичних мережах доступу враховується тільки коннективність OLT з кожною ONU (downstream трафік) і кожної ONU з OLT (upstream трафік), що вірно для всіх топологій PON. Отже, OLT є єдиним пристроєм, який може здійснювати арбітраж для доступу до каналу з поділом за часом.

Проблема схеми динамічного арбітражу, заснованої на OLT, полягає в тому, що OLT не знає, скільки байтів буферизувала кожна ONU. Імпульсивність інформаційного трафіку заважає точному передбаченню рівня заповнення буфера. Для вирішення цієї проблеми можна використовувати

схему, засновану на обміні повідомленнями Grant і Request. ONU надсилає запити (Requests), повідомляючи про зміну стану, наприклад, обсягу буферизованих даних. OLT обробляє всі запити і присвоює різні тимчасові домени для ONU. Повідомлення про присвоєння доменів доставляються ONU за допомогою повідомлень Grant.

Перевага централізованого ухвалення рішень про присвоєння тимчасових доменів полягає в тому, що OLT знає стан всієї мережі і може переключитися на інший алгоритм за необхідності, не вимагаючи від ONU моніторингу стану мережі або узгодження параметрів. Це робить ONU простішими і дешевшими, а мережу загалом надійнішою.

3.3 Порівняльний аналіз витрат на обладнання для технологій EPON і GPON

Для проведення порівняльного аналізу витрат на обладнання для технологій EPON і GPON. Ціни на обладнання взято за червень. 2023 року.

Для GPON розглянемо стійку OLT Huawei MA5800 з використанням портових інтерфейсних плат GPON серії Huawei MA16.

Для розрахунку вартості обладнання врахуємо повну комплектацію Huawei MA5800, включно з сімома сервісними слотами, портовими інтерфейсними платами GPON серії Huawei MA16 з 16 портами GPON і модулем C+ SFP. Це забезпечує повну ємність для 14336 абонентів.

| Параметри | Значення |
|---------------------------------|------------------------------|
| Максимальна кількість абонентів | 14336 |
| Тип OLT | Huawei MA5800 (7 слотів) |
| Тип інтерфейсної плати | Huawei MA16 з модулем C+ SFP |

| | |
|---|-------------|
| Максимальна кількість абонентів на SFP порт | 128 |
| SFP модулів на плату | 16 |
| Необхідна кількість плат | 7 |
| Ринкова вартість OLT Huawei MA5800 | 200,000 грн |
| Вартість однієї інтерфейсної плати | 20,000 грн |
| Загальна вартість обладнання | 340,000 грн |

Таблиця 3.3 - GPON Технологія з OLT Huawei MA5800.

Для EPON розглянемо концентратор BDCOM P3310C.

Для розрахунку вартості обладнання врахуємо кількість концентраторів BDCOM P3310C, яка потрібна для того, щоб забезпечити таку саму кількість абонентів, що дорівнює 14336.

| Параметри | Значення |
|---|----------------------------|
| Максимальна кількість абонентів | 14336 |
| Тип обладнання | Концентратори BDCOM P3310C |
| SFP модулів на пристрій | 4 |
| Максимальна кількість абонентів на SFP порт | 64 |
| Необхідна кількість концентраторів | 56 |
| Вартість одного концентратора | 20,000 грн |
| Загальна вартість обладнання | 1,120,000 грн |

Таблиця 3.4 - EPON Технологія з Концентраторами BDCOM P3310C

GPON з OLT Huawei MA5800: Загальна вартість обладнання для підключення 14336 абонентів становить 340,000 гривень. Це включає вартість OLT і необхідних інтерфейсних плат.

EPON з BDCOM P3310C: Для забезпечення порівнянної кількості абонентів потрібно значно більше концентраторів (56 штук), із загальною вартістю 1,120,000 гривень.

Отже, використання GPON технології з OLT Huawei MA5800 є більш економічним рішенням для підключення даної кількості абонентів у порівнянні з EPON технологією з використанням концентраторів BDCOM P3310C.

3.4 Порівняння споживання електроенергії

Економія електроенергії відіграє ключову роль у скороченні споживання природних ресурсів, зменшенні викидів шкідливих речовин в атмосферу і збереженні навколишнього середовища. І економія електроенергії дає змогу економити гроші провайдеру.

Кожна плата Huawei MA16 з модулем C+ SFP споживає 50 ват за максимального завантаження всіх SFP портів, а OLT Huawei MA5800 споживає приблизно 547.5 ват за умови підключення всіх плат. Один концентратор BDCOM P3310C становить 40 Вт. Розрахунок електроенергії наведено в таблиці 3.5

| Параметри | Значення GPON | Значення EPON |
|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| Обладнання | OLT Huawei MA5800 та 7 плат Huawei MA16 з модулем C+ SFP | 56 концентраторів BDCOM P3310C |
| Загальне споживання енергії на годину | 0.8975 кВт | 2.24 кВт |
| Місячне споживання енергії | 646.2 кВт | 1612 кВт |

| | | |
|---|-----------|------------|
| Вартість електроенергії в Україні для бізнесу | 7 грн/кВт | 7 грн/кВт |
| Місячні витрати на електроенергію | 4523 грн | 11,289 грн |

Таблиця 3.5 - Розрахунок електроенергії

Таким чином, використання GPON технології є не тільки більш економічно ефективнішим з точки зору витрат на електроенергію, а й більш ефективним у плані збереження енергетичних ресурсів і зниження впливу на навколишнє середовище порівняно з EPON технологією.

4 ВДОСКОНАЛЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ GPON

4.1 Невідповідність динамічного діапазону активного обладнання бюджету загасання GPON для різних довжин хвиль

Залежно від виробника і типу оптичного роз'єму максимально допустимими втратами на конекторному з'єднанні вважаються не 0.75 дБ, а, наприклад, 0.4 дБ або 0.25 дБ, а іноді й менше. На зварне з'єднання може відводитися не 0.3 дБ, а 0.1 дБ або навіть 0.05 дБ. Це відбивається на розрахунках: межі допустимих втрат стають суворішими.

Потрібно враховувати, що в мережах GPON використовуються не тільки традиційні для одномодових систем довжини хвиль 1310 нм і 1550 нм, а й 1490 нм, і 1625 нм (особливо якщо йдеться про тестування на "живій" мережі). Граничне загасання для різних довжин хвиль відрізняється, і якщо розрахунок бюджету виконано для 1490 нм, а фактичні втрати виміряно на іншій довжині хвилі, у цифри необхідно вносити поправку. Для перерахунку потрібно звернутися до технічних даних виробника волокна. Наприклад, для волокна Corning заявлено такі показники (для порівняння наведено вимоги стандартів до одномодових волокон типів А-С):

| Довжина хвилі | Загасання для волокна Corning SMF-28e+ LL (Low Loss) | Вимоги G.652.D, тип А | Вимоги G.652.D, тип В | Вимоги G.652.D, тип С |
|---------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1310 нм | ≤ 0.32 | ≤ 0.34 | ≤ 0.33 | ≤ 0.35 |
| 1490 нм | ≤ 0.21 | ≤ 0.24 | - | - |
| 1550 нм | ≤ 0.18 | ≤ 0.21 | ≤ 0.19 | ≤ 0.21 |
| 1625 нм | ≤ 0.20 | ≤ 0.24 | ≤ 0.22 | ≤ 0.23 |

Таблиця 4.1 - Загасань на різних кабелях

Але головна особливість систем GPON полягає в тому, що в них використовуються сплітери, які ділять загальний низхідний сигнал на всіх користувачів. Поділ сигналу еквівалентний дуже великим втратам. Сплітери пасивні, потужність сигналу пропорційно зменшується в силу самого факту поділу сигналу. Для прикладу, якщо спліттер має фактор ділення 1x8, тоді, припустимо, сигнал, що дорівнює ста відсоткам, при діленні на вісім дорівнюватиме дванадцяти з половиною відсоткам. Деяка децима випромінювання губиться через неідеальне конструктивне виконання дільника, але основні втрати залежать від кратності ділення - на сплітері 1:16 вони приблизно вчетверо вищі, ніж на 1:4 і т.д. Точні значення виробники наводять в описі до конкретних моделей спліттерів, але в середньому розподіл сигналу на два напрямки відповідає зростанню втрат на величину між 3 і 4 дБ.

| Спліттер | 1x2 | 1x4 | 1x8 | 1x16 | 1x32 | 1x64 |
|----------------|------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| Середні втрати | 3.8÷4.0 дБ | 7÷8 дБ | 10÷11 дБ | 13÷14 дБ | 16÷18 дБ | 20÷21 дБ |

Таблиця 4.2 - Угосання сигналу

Оскільки кожен спліттер вносить загасання в сигнал. Збільшення кількості спліттерів призводить до збільшення загального загасання, що може знизити дальність передавання сигналу і вимагати використання підсилювачів, але якщо збільшити кількість спліттерів тільки на кінцевих вузлах, це не сильно позначиться, оскільки квартири абонентів будуть у прямому доступі.

Збільшення кількості спліттерів з меншим розподілом у під'їздах абонентів може покращити рівень обслуговування для кожного абонента, оскільки сигнал через менший розподіл матиме менші загасання.

Стандарти PON визначають максимальну кількість користувачів на один спліттер. Перевищення цього числа може порушити відповідність стандартам і зіткнутися з технічними обмеженнями, тому слід використовувати більше спліттерів на кінцевих точках у під'їздах абонентів, з меншою кількістю абонентів на кожному.

Спліттер вносить дуже значущий внесок у сукупні втрати в лінії. Їх обов'язково потрібно враховувати в розрахунку бюджету загасання, за яким, своєю чергою, робиться вибір активного обладнання.

Оскільки низхідний потік (Downstream) використовує довжину хвилі 1490 нм, а висхідний потік (Upstream) - довжину хвилі 1310 нм, розрахунок бюджету повинен виконуватися для обох випадків. Отримані значення дещо відрізняться. Так, для сегмента завдовжки 1 км (погонне загасання 0.25 дБ/км для 1490 нм і 0.35 дБ/км для 1310 нм), що використовує спліттер 1x32 (втрати 18 дБ), який містить 6 конекторних з'єднань (втрати 0.25 дБ на кожному), отримаємо сумарні втрати 19.75 дБ на довжині хвилі 1490 нм і 19.85 дБ на довжині хвилі 1310 нм. Якщо в системі використовувалися зварні з'єднання і пігтейли, втрати на муфтах також необхідно включити в розрахунок. У результаті отримаємо максимально допустимі значення втрат у пасивному середовищі передачі.

Для вибору активного обладнання в розрахунок для надійності рекомендується закладати додаткові 3 дБ - запас за потужністю. Тоді значення складуть відповідно 22.75 дБ і 22.85 дБ, і пристрої OLT і ONT потрібно буде вибирати з урахуванням цих величин.

4.1.1 Оновлення портових інтерфейсних плат

Один з ключових способів зменшення загасання в оптичних мережах, крім якісного варіння волокна - це оновлення портових інтерфейсних плат. Наприклад, у серії Huawei MA16 є різні моделі відмінні за характеристиками. При оновленні з портової інтерфейсної плати GPON OLT з модулем B+ SFP,

на портову інтерфейсну плату GPON OLT з модулем C+ SFP або на ще новіші та потужніші плати з модулем C++ SFP. Крім цього збільшиться кількість абонентів на порту, оскільки на плату з B+ SFP можна під'єднати тільки 64 абоненти, а на C+ SFP і C++ SFP інтерфейсні плати вже 128 абонентів.

| Модуль | Оптична потужність модуля (дБм) | Чутливість приймача (дБм) |
|---------|---------------------------------|---------------------------|
| C++ FSP | 6 дБм~10 дБм | -35 дБм |
| C+ FSP | 3 дБм~7 дБм | -32 дБм |
| B+ FSP | 1.5 дБм~5 дБм | -28 дБм |

Таблиця 4.3 - Технічні характеристики модулів GPON OLT серії Huawei MA16

Завдяки підвищеній потужності і чутливості приймача в модулі C++ SFP, поліпшується якість сигналу в оптичних мережах. Це особливо важливо в умовах, де сигнал абонента досягає -30 дБм. У таких сценаріях модулі C++ SFP забезпечують надійне під'єднання, тоді як модулі B+ SFP через нижню чутливість приймача (-28 дБм) можуть зіткнутися з проблемами.

Крім того, через коефіцієнт ділення сигналу, відбувається його загасання на розгалуженнях мережі. З поліпшеними характеристиками модулів C++ SFP, ефективність передавання сигналу значно підвищується, що сприяє зниженню загасань і поліпшенню загальної продуктивності мережі.

4.1.2 Застосування Оптичних Підсилювачів

Оптичні підсилювачі - це пристрої, які підвищують потужність сигналу оптоволоконних кабелів без перетворення їх на електричні сигнали.

Оптичні підсилювачі значно покращують ефективність і надійність оптоволоконних мереж. Вони підвищують потужність оптичних сигналів у волоконно-оптичних лініях, що сприяє компенсації загасання, викликаного

довжиною кабельних магістралей і безліччю з'єднань. Це особливо важливо для довгих магістральних і метрополітенівих мереж, де загасання може істотно впливати на якість зв'язку.

Поліпшення співвідношення сигнал/шум (SNR) - ще одна важлива перевага, яку надають оптичні підсилювачі. Це поліпшення якості сигналу знижує ймовірність помилок у передаванні даних, що критично для високошвидкісних і високонадійних мережевих застосунків.

У системах мультиплексування з щільним поділом хвильових каналів (DWDM), оптичні підсилювачі забезпечують одночасне посилення безлічі хвильових каналів. Це значно збільшує пропускну здатність мережі, дозволяючи передавати більше даних через одне волокно.

Крім того, оптичні підсилювачі дають змогу передавати сигнали на значно більші відстані без необхідності їхньої регенерації. Це збільшує дальність передачі і загальну ефективність мереж, роблячи їх ідеальними для використання у великих географічних регіонах.

Серед прикладів моделей оптичних підсилювачів можна виділити волоконні підсилювачі, леговані ербієм (EDFA), такі як Finisar's PowerFlex EDFA, які забезпечують високу продуктивність завдяки використанню ербію для посилення оптичного сигналу. Напівпровідникові оптичні підсилювачі (SOA), наприклад, Thorlabs' SOA, використовують напівпровідниковий матеріал для посилення і часто застосовують у системах із короткими з'єднаннями. Також варто згадати Раманівські підсилювачі, наприклад, Lumentum's Raman Fiber Amplifier, які використовують ефект Раманівського розсіювання для посилення сигналів на дуже великих відстанях.

4.1.3 Побудова мережі інтернету та прокладання кабелю

Захист оптоволоконна від перегинів важливий для забезпечення надійної роботи оптичного зв'язку. Перегини можуть викликати втрату сигналу, збільшувати загасання і навіть призводити до поломки волокна.

Слід використовувати оптичні кабелі з багатомодовими волокнами з буферами з низьким радіусом вигину. Ці кабелі призначені для використання в локальних мережах (LAN) та інших додатках, де можливі сильні перегини. Вони мають гнучкі буфери, що дають змогу зменшити радіус вигину. Буфер з низьким радіусом вигину в оптоволоконних кабелях - це шар матеріалу, доданий навколо оптоволоконного волокна для зменшення радіусу вигину і запобігання ушкодженням волокна під час вигинів. Цей буфер забезпечує гнучкість кабелю і зменшує вплив перегинів на оптоволокно, що дає змогу ефективно використовувати такі кабелі в умовах, де потрібні сильні вигини без істотних втрат сигналу. Кабелі з буферами низького радіусу вигину часто застосовують в обмеженому просторі або там, де потрібна висока гнучкість, наприклад, під час встановлення у вузьких трубах або всередині обладнання. Використання таких кабелів під час прокладання оптоволоконна до квартири абонента забезпечить стійкість кабелю до вигинів і дасть змогу тим самим поліпшити загасання.

Оптичні кабелі з одномодовими волокнами з низьким радіусом вигину: ці кабелі використовуються в більш довгих передачах даних, таких як міжміські та міжнародні мережі. Як і кабелі з багатомодовими волокнами, вони можуть бути розроблені з буферами з низьким радіусом вигину.

У процесі побудови мереж Інтернету, одним з ключових аспектів є вибір методу прокладання оптоволоконного кабелю. На сьогодні багато провайдерів використовують повітряний спосіб прокладання кабелю до абонента. Однак цей метод часто призводить до виникнення множинних вигинів і пошкоджень оптоволоконна, що, своєю чергою, спричиняє збільшення загасання сигналу. Такі проблеми можуть призвести до значних втрат пакетів даних і збільшення часу затримки відповіді сервера, водночас значення загасання через вигини або впливи навколишнього середовища на кабель можуть досягати до -10 дБ.

Щоб вирішити ці проблеми і поліпшити якість зв'язку, останнім часом провайдери все частіше застосовують оптичний малогабаритний кабель типу FTTH (Fiber to the Home). Такі кабелі включають у свою конструкцію два

силові елементи зі сталі, що підвищує їхню міцність і стійкість до фізичних впливів. Крім того, для забезпечення додаткового захисту і запобігання вигинів, монтаж кабелю від сплітера-роздільнювача до приміщення абонента часто проводиться в поліпропіленових трубах. Це дає змогу уникнути вигинів оптоволоконного кабелю і знижує ризик ушкоджень, тим самим забезпечуючи більш стабільне і якісне з'єднання.

Встановлення оптоволоконних кабелів з надлишковою довжиною являє собою стратегію, спрямовану на забезпечення гнучкості та безпеки в інфраструктурі зв'язку. Цей підхід дає змогу створити запас, який може бути затребуваний у різних сценаріях.

Однією з ключових переваг встановлення надлишкової довжини є запобігання надлишкових напруг під час вигинів кабелю. Маючи додаткову довжину, можна легко керувати радіусом вигину, мінімізуючи потенційні ризики втрати сигналу або пошкодження оптоволоконного кабелю під час прокладання в складних умовах.

Цей запас також надає можливість корекції маршруту в разі потреби. Можливість адаптувати маршрут оптоволоконного кабелю при зміні вимог або при появі несподіваних перешкод у навколишньому середовищі є важливим фактором для забезпечення ефективності та довговічності інфраструктури.

Ба більше, надлишкова довжина слугує запасом для майбутнього розширення мережі. За необхідності додавання нових ділянок або під'єднання додаткового обладнання, наявність додаткового кабелю полегшує процес розширення, усуваючи необхідність у додатковому укладанні.

Встановлення кабелю з надлишковою довжиною також сприяє зменшенню ризику пошкоджень під час встановлення. У процесі монтажу можуть виникнути непередбачувані ситуації, як-от гострі кути або несподівані перешкоди. Маючи додатковий матеріал, можна ефективно реагувати на зміни маршруту і зменшити ризик пошкоджень оптоволоконного кабелю.

Таким чином, встановлення оптоволоконних кабелів з надлишковою довжиною не тільки забезпечує технічну гнучкість, а й створює резерв, підвищуючи загальну надійність і стійкість інфраструктури зв'язку.

4.2 Розвиток Гібридних TDM-WDM Технологій у Системах PON

Сучасні дослідження в цій галузі спрямовані на пошук поліпшень. Стандарт IEEE GPON і стандарт ITU-T XGPON засновані на TDM-PON і використовують одну довжину хвилі для низхідного потоку і одну довжину хвилі для висхідного потоку, витрачаючи доступну смугу пропускання в одному волокні [3]. Оскільки використання чистого WDM наразі не таке можливе, як використання TDM, комбінування TDM і WDM стає рішенням для більш ефективного використання смуги пропускання. Крім того, використання однієї довжини хвилі для групи користувачів є можливим рішенням у парадигмі TDM-WDM PON. Для збільшення можливостей мережі в сучасних тенденціях розвитку використовується кілька довжин хвиль для низхідного потоку і кілька для висхідного, архітектура мережі показана на рисунку 3. Зверніть увагу, що на відміну від стандартизованої архітектури, показаної на рисунку 1, архітектурні тенденції призводять до спільного використання довжини хвилі в тимчасовій області, що забезпечує більшу гнучкість при розподілі хвильових каналів відповідно до заданого попиту, тобто користувачеві може бути призначена менш перевантажена довжина хвилі, щоб задовольнити його поточний попит протягом певного періоду часу. Гібридна TDM-WDM є хорошим варіантом не тільки для NG-PON1, а й для NG-PON2, оскільки розподіл хроматичної дисперсії відбувається за кількома використовуваними довжинами хвиль, а не тільки за однією. Ці особливості дають змогу збільшити пропускну здатність мережі до очікуваних 40 Гбіт/с, на які орієнтований NG-PON2. Гнучкість, що забезпечується поділом загальної кількості користувачів на різні більш дрібні групи і управлінням ресурсами в залежності від цього, також є важливою характеристикою, яка

обговорюється для мереж наступного покоління. Найбільш важливою проблемою використання WDM в мережах PON є необхідність використання пристроїв селекції довжини хвилі на стороні ONU, вартість цих пристроїв висока порівняно з вартістю пристроїв, які використовуються для роботи з TDM-PON; це робить TDM кращим на сьогоднішній день через економічно ефективне відношення.

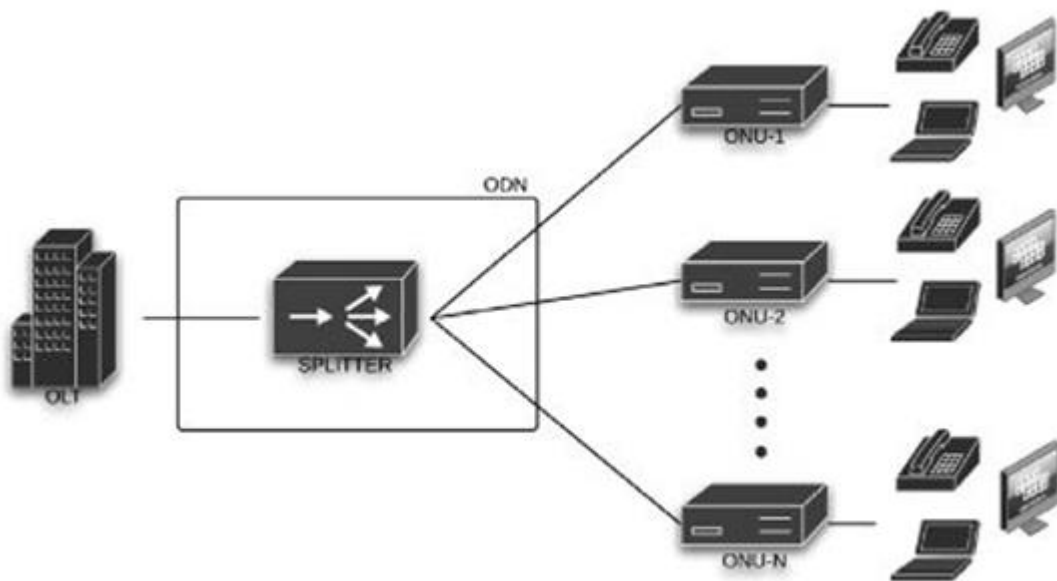


Рисунок 4.1 - Базова топологія PON.

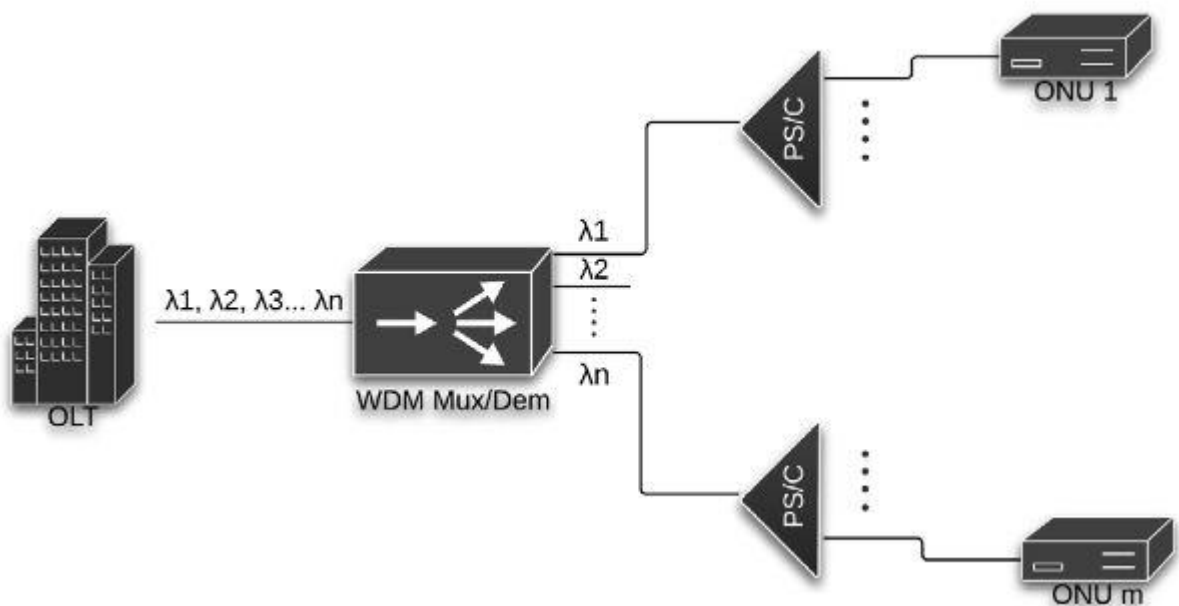


Рисунок 4.2 - Архітектура гібридної системи TDM-WDM.

З іншого боку, конвергенція дротових і бездротових послуг є важливим аспектом у мережах доступу. Зростання кількості бездротових пристроїв, таких як смартфони та планшети, вимагає більшої пропускної здатності, а висока вартість окремої роботи дротових і бездротових мереж доступу зумовлює необхідність інтеграції цих технологій в одній інфраструктурі [4]. Конвергенція дротових і бездротових мереж можлива завдяки технологіям RoF, основною метою яких є транспортування широкосмугових сигналів до розподілених базових станцій бездротового доступу за допомогою оптичної мережі доступу [5]. Одночасна модуляція сигналів базової смуги (BB) і радіочастотних (RF) сигналів є запропонованою моделлю для систем RoF [6] [7]. Однак цей процес може спричинити проблеми завмирання сигналу через дисперсію у волоконній оптиці, тому ретельна обробка сигналу з використанням оптичної фільтрації в процесі прийому є обов'язковою. Загалом, генерація сигналу для систем RoF залежить від правильної конфігурації зовнішнього модулятора, оскільки і BB, і RF сигнали конкурують за використання динамічного діапазону модулятора. Крім того, чутливість рецепторів залежить від індексу модуляції (IM) радіочастотного сигналу, причиною такого зв'язку є те, що IM безпосередньо впливає на нелінійність МЗМ. Так само, як і у випадку з ВЧ, існує зв'язок між BB-IM і чутливістю BB-рецептора. З іншого боку, динамічний розподіл ресурсів у мережах PON є перспективною функцією для інтеграції дротових і бездротових послуг. Кожен користувач може запросити фіксовані або мобільні послуги в будь-який час, дозволивши системі скоригувати розподіл ресурсів. Ця особливість призводить до підвищення ефективності використання смуги пропускання [8].

Пристрої в мережах RoF несуть велику відповідальність, зменшення розміру стільника з метою покращення можливостей в зоні покриття за рахунок повторного використання частоти на кожній стільниковій комірниці призводить до того, що система повинна приділяти більше уваги міжстільниковому хендоверу. Управління хендовер і динамічним розподілом

ресурсів з центральної станції (CS) призводить до економічно недоцільних мереж RoF, тому створення вузла віддаленого доступу (RAN) між CS і термінальними пристроями для надання додаткових функцій може стати вирішенням проблеми. Функціональні можливості, згадані вище, використовують активні пристрої, такі як оптичне крос-з'єднання (OXC), таким чином, мережі з управлінням передачею і динамічним розподілом ресурсів відрізняються від концепції пасивної мережі. Коли в процесі передачі беруть участь активні пристрої, мережа вважається активною оптичною мережею (AON). Однією з переваг AON перед PON є можливість додавання додаткових функцій і процесів до передачі, використовуючи переваги поведінки "точка-точка" (P2P). Активні мережі дозволяють використовувати такі функції, як управління хендовер, динамічна маршрутизація і динамічний розподіл ресурсів. AON також дозволяє використовувати термінальні пристрої меншої складності, які потребують меншої обчислювальної потужності. Це базується на тому, що ці пристрої не повинні розрізняти дані, що надсилаються до них, від даних, що надсилаються до інших ONU, використовуючи механізми безпеки для технологій WDM або TDM [9].

Недоліки AON в основному пов'язані з витратами на обслуговування і розгортання, причому останнє стосується міських умов, де PON є більш конкурентоспроможним. Незважаючи на те, що пасивні мережі мають недоліки, пов'язані з обчислювальними завданнями під час процесу передачі, це також є темою досліджень, в яких недоліки та недоліки PON намагаються посилити. Кілька досліджень представляють рішення проблем, пов'язаних з передачею і динамічним розподілом ресурсів в GPON [7] [10]. Більш складні в обчислювальному плані теми, такі як методи налаштування для ефективного управління мережевими ресурсами і параметрами, обговорювалися як рішення проблем в системах PON, що відкривають широкий спектр можливих можливостей для пасивних оптичних мереж.

Механізм TDM-PON, що виділяє тимчасові інтервали кожному користувачеві на одній довжині хвилі, не тільки обмежує доступну смугу

пропускання кожного користувача, а й також значно витрачає доступну смугу пропускання самого оптичного волокна. Впровадження в систему PON технології мультиплексування з поділом за довжиною хвилі, тобто WDM-PON, значно збільшить пропускну спроможність доступу користувачів і задовольнить максимальні потреби користувачів. Тому WDM-PON вважається рішенням для мережі доступу наступного покоління.

У даній моделі мережі, на відміну від існуючої GPON, в якій кожен ONU отримує одну довжину хвилі даних від OLT, як показано на рисунку 1, кілька довжин хвиль передаються для зв'язку OLT з різними ONU за допомогою оптичного пасивного пристрою, як показано на рисунку 4. Кожна довжина хвилі ділиться між декількома ONU, а не виділяється для одного ONU, і призначення довжини хвилі може бути статичним або динамічно змінюватися під час зв'язку залежно від того, чи використовується на ONU перебудований або фіксований фільтр для вибору довжини хвилі. Дана пропозиція спрямована на забезпечення функціональних можливостей, заснованих на вимогах, визначених у попередньому розділі, а саме: підвищення пропускну спроможності, динамічний розподіл смуги пропускання та конвергентне передавання дротових і бездротових сигналів, що забезпечується системою TDM-WDM PON.

4.2.1 Технічні аспекти і розвиток мультиплексування в WDM-PON системах

У системах WDM-PON пристрій для мультиплексування з поділом за довжиною хвилі часто називається маршрутизатором довжини хвилі. Цей пристрій здійснює демультіплексацію сигналу, що передається низхідною лінією зв'язку, і направляє його до відповідних оптичних мережевих пристроїв (ONU), а також мультиплексує сигнал висхідної лінії зв'язку в оптичне волокно для передачі на оптичний лінійний термінал (OLT). Його основні

характеристики охоплюють втрати, що вносяться, перехресні перешкоди, розкид каналів, залежність від поляризації і температурну чутливість.

Мультиплексування - це техніка в галузі телекомунікацій і мережевих технологій, яка дає змогу передавати кілька потоків даних через один канал зв'язку або передавальне середовище. Основна мета мультиплексування полягає в ефективному використанні ресурсів каналу та підвищенні пропускної здатності мережі.

Мультиплексування дає змогу оптимізувати використання ресурсів мережі, збільшувати пропускну спроможність і забезпечувати ефективне передавання даних між різними пристроями та системами.

На даний момент доступні різноманітні пристрої з різною структурою, такі як тонкоплівкові інтерференційні фільтри, акустооптичні фільтри, волоконні Брегговські решітки, АВГ та інші. За наявності невеликої кількості каналів часто віддають перевагу тонкоплівковим інтерференційним фільтрам і волоконним решіткам. У разі систем WDM з більш ніж 16 каналами, основним вибором для пристроїв мультиплексування/демультиплексування є АВГ, головним чином тому, що втрати в АВГ не залежать від кількості каналів. Масивні хвилевідні решітки, розроблені останніми роками, мають переваги компактних розмірів, легкої інтеграції, вузької відстані між каналами і стабільної роботи, що сприяє розвитку WDM-PON.

Хоча АВГ широко застосовується в системах DWDM, його використання в мережах PON стикається з обмеженням - нездатність використання активних пристроїв контролю температури, що призводить до дрейфу довжини хвилі через зміни температури. Тому важливим компонентом для систем WDM-PON стають генератори сигналів довільної форми, стійкі до температурних впливів. Технологія термостійких АВГ відносно зріла, проте її вартість вища порівняно зі звичайними АВГ. За умови масового виробництва і широкого застосування, вартість, ймовірно, знизиться і стане порівнянною зі звичайними АВГ.

Одержувач в системі WDM-PON включає в себе фотоприймач і відповідну схему відновлення сигналу, також відому як цифровий оптичний приймач. У даному контексті широко використовуються PIN-фотодіоди і лавинні фотодіоди як фотодетектори, що застосовуються залежно від необхідної чутливості. Цифровий оптичний приймач зазвичай формується попереднім підсилювачем, основним підсилювачем і схемою відновлення тактових даних (CDR).

Приймач у системі WDM-PON складається з демультимплексора і масиву приймачів. Важливо враховувати лінійні перехресні перешкоди в демультимплексорі, які можуть призвести до швидкого зниження потужності сигналу. Методи управління перехресними перешкодами включають в себе вирівнювання потужності кожного оптичного мережевого пристрою (ONU), подвійну фільтрацію прийнятого сигналу та інші підходи.

4.2.2 Моніторинг довжини хвилі

Оскільки WDM-PON включає в себе використання різних довжин хвиль, а генератор сигналів довільної форми зазвичай розташовується на відкритому повітрі без регулювання температури, температура може значно впливати на смугу пропускання генератора сигналів довільної форми. Загальний діапазон температур для Arrayed Waveguide Grating (AWG) становить від -40 до 85°C , а швидкість зміни смуги пропускання становить $0.011 \text{ нм}/^{\circ}\text{C}$. Таким чином, при зміні температури на 1 градус Цельсія, може відбутися зсув довжини хвилі на 1.4 нм . Цей зсув буде відповідати інтервалу довжин хвиль DWDM ($100\sim 200 \text{ ГГц}$), що серйозно вплине на роботу WDM-PON. Тому необхідно проводити роботи з визначення та налаштування довжини хвилі на OLT.

Моніторинг довжини хвилі здійснюється з використанням диференціального алгоритму для порівняння потужності передачі каналу з потужністю, що проходить через маршрутизатор довжини хвилі. Отриманий різницевий сигнал використовується для визначення зміни температури. Якщо

різницею сигнал зменшується, то температура змінюється в поточному напрямку на ΔT . В іншому разі температура зміниться на ΔT у протилежному напрямку, вказуючи на збільшення неузгодженості каналів. При цьому швидкість і відстань кроку ΔT регулювання температури мають бути правильно підібрані.

Моніторинг довжини хвилі може бути виконаний шляхом контролю потужності каналу низхідної лінії зв'язку і потужності каналу висхідної лінії зв'язку. Для мереж PON, що використовують тільки WDM у низхідному каналі, потрібен моніторинг тільки потужності каналу низхідного каналу. У разі WDM-PON з використанням висхідної лінії зв'язку з поділом спектра, можна порівняти потужність сигналу висхідної лінії до і після демультимплексування на OLT, що вимагає додавання відгалужувача для контролю довжини хвилі без використання додаткових каналів. У додатку Б показано реалізацію розрахунку довжини хвилі для WDM-PON технології.

Внесок додаткових довжин хвиль у пропускну здатність показано на рисунку 3.5. Загалом, пропускну здатність на всіх довжинах хвиль поводить лінійно для всіх навантажень трафіку, за винятком конфігурації з однією довжиною хвилі, яка при високому навантаженні (>0.8) через втрату пакетів, призводить до зниження пропускну здатності системи. Для 2, 3 і 4 довжин хвиль, зі зменшенням втрат пакетів, пропускну здатність збільшується, досягаючи чистого значення приблизно 2,85 Гбіт/с у випадку трьох додаткових довжин хвиль в мережі з 80% не профільних ONU. Це становить приблизно 6% - 14% додаткової пропускну здатності для 80% непрофільних ONU. Це показник того, яку надлишкову пропускну здатність система TDM-WDM PON здатна забезпечити в разі запитів на високу пропускну здатність від ONU.

Підхід до створення вдосконаленої моделі мережі GPON з багаторазовим динамічним розподілом довжин хвиль

$$\lambda = \sum_{k=1}^K \lambda_k$$

Рисунок 4.3 - Формула для розрахунку швидкості надходження даних на ONU

Це означає, що швидкість встановлення з'єднання [стан (w)] залежить від M кількості ONU, які не мають активного з'єднання [стан (w-1)]. Таким чином, цей перехід відбувається в одиницю часу зі швидкістю $(M[w-1])\lambda$. Тому перехід зі [стану (w)] у [стан (w-1)] визначає швидкість, з якою довжина хвилі звільняється в мережі, ця швидкість задається wR , де R - швидкість обслуговування каналу довжини хвилі. Тоді, згідно з [20], R може бути визначена таким чином:

$$R = \sum_{k=1}^K v_k i_k(C_k) \hat{p}(C_k)$$

Рисунок 4.4 - Формула очікуваного значення

Де i_k - середнє число класів обслуговування в межах даної довжини хвилі, а $\hat{p}(C_k)$ - умовна ймовірність того, що частина смуги пропускання, що надається довжиною хвилі, зайнята, коли ця довжина хвилі використовується. Однак вираз, визначений у рисунку 4.4, справедливий тільки для випадку, коли пропускна здатність, запитувана кожною послугою або класом послуг, фіксована, тобто пропускна здатність, запитувана з'єднанням, менша від доступної пропускної здатності довжини хвилі. У нашому дослідженні ми припускаємо, що трафік динамічний, тобто порції пропускної спроможності, запитувані кінцевими користувачами, змінюються залежно від їхніх запитів. Для цього необхідно визначити порогові значення пропускної здатності. У цьому контексті з'єднання з K кількістю послуг має $T(k)$ кількість порогових

значень пропускної спроможності ($B_{wk,1}, B_{wk,2}, \dots, B_{wk,T(k)}$), і кожна з цих пропускних спроможностей має відповідний розподіл часу обслуговування $\hat{P}_{k,s}$. Тоді швидкість обслуговування хвильового каналу з урахуванням динамічного трафіку може бути виражена як:

$$R = \sum_{k=1}^K (v_k i_k(C_k) \hat{P}(C_k)) + \sum_{k=1}^K \left(\sum_{T=1}^{T(K)} (v_{k,s} i_{k,s}(C_{k,s}) \hat{P}(C_{k,s})) \right)$$

Рисунок 4.5 - Формула розрахунку очікуваної нагороди з урахуванням множинних класів послуг і зайнятості діапазонів частот

У цьому разі $i_{k,s}(j)$ - це середня кількість послуг або класів послуг із вимогою пропускної спроможності $C_{k,s}$, коли у хвильовому каналі зайнято j порцій пропускної спроможності. Тоді ймовірність використання n довжин хвиль у PON $P(N)$ може бути отримана з рівнянь балансу швидкостей, як описано в [11], таким чином:

$$P(n) = \left(\frac{\lambda}{R} \right)^n \frac{\prod_{j=1}^n [M - (w-1)]}{n!} P(0), \quad n = 1, 2, \dots, N$$

Рисунок 4.6 – Формула ймовірність того, що жодна з довжин хвиль не зайнята в мережі

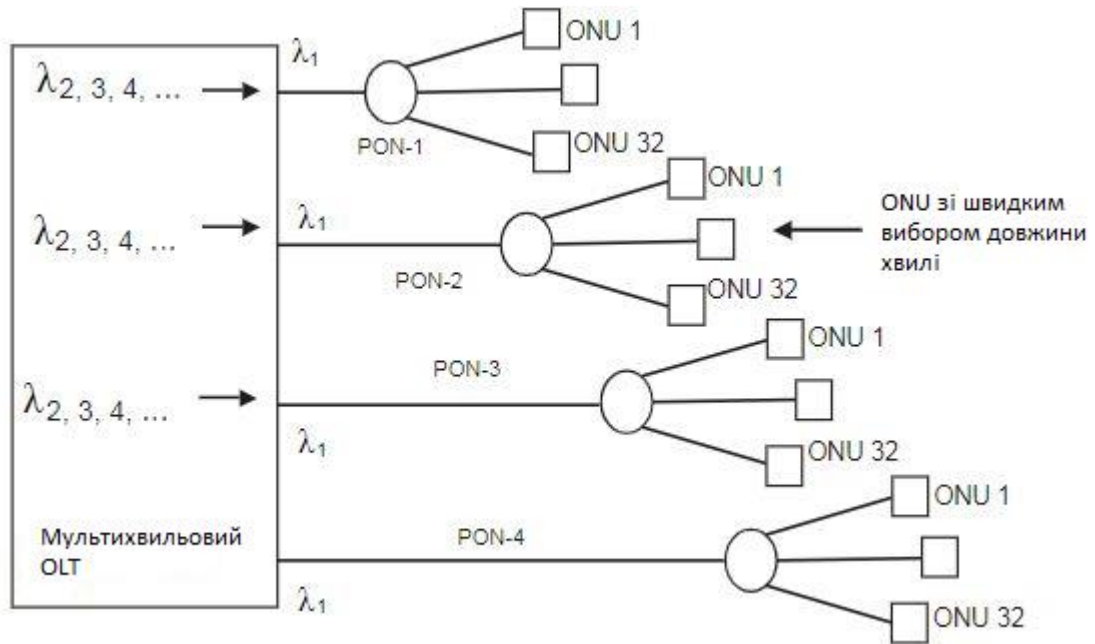


Рисунок 4.7 - Підхід до модернізованої моделі мережі GPON з мультидинамічним розподілом хвильового потоку

Новизна TDM-WDM PON полягають у визначенні розмірів хвильових каналів, необхідних для визначення кількості ресурсів, необхідних для задоволення вимог до пропускної здатності.

4.3 Симетричний тип підключення

Один із варіантів розвитку технології GPON - це перехід від асиметричного підключення, який обмежує пропускну здатність усіх абонентів мережі лише однією шиною 2400 мб/с.

Асиметричні оптичні комутатори мають нерівну кількість вхідних (M) і вихідних (N) портів (MxN, де $M \neq N$). Оптичний перемикач такого типу може бути як простим 1xn (де $N > 1$), так і MxN (де $M < N$). Звичайними прикладами є 1x2 або 64x128. Через асиметричність мережі швидкість становить 2.5 Гбіт/с у напрямку від оператора до абонента (downstream) 1.25 Гбіт/с від абонента до оператора (upstream)

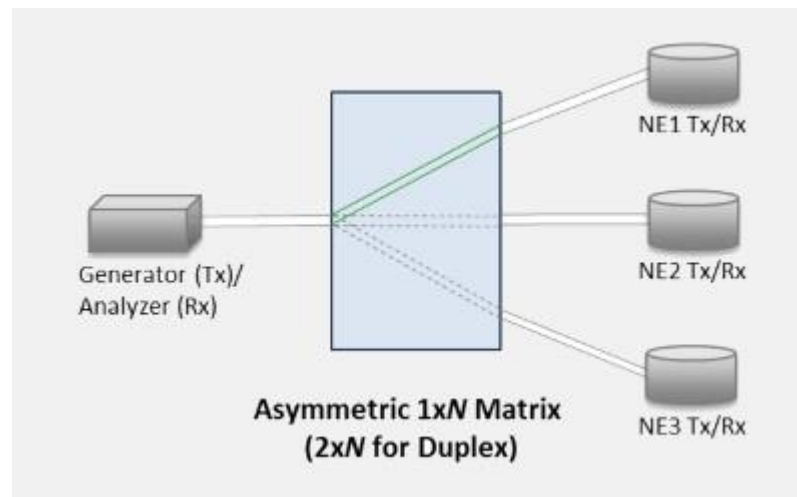


Рисунок 4.8 - Асиметричне підключення

В умовах більшої кількості пристроїв, проблема обмеженої пропускної здатності в мережах GPON стає особливо актуальною в багатоквартирних будинках. Одним з основних викликів є зосередженість всіх абонентів на одному оптичному лінійному терміналі (OLT), що обмежує пропускну здатність каналу.

Цей підхід, де всі пристрої підключаються до одного OLT, може призвести до обмеженої пропускної спроможності оптичного волокна, що ускладнює забезпечення високих швидкостей передачі даних для кожного абонента. Збільшення навантаження на канал може також призвести до перевантажень і погіршення якості обслуговування, впливаючи на користувацький досвід.

Загальний OLT обмежує гнучкість управління пропускнуою спроможністю для окремих абонентів. Ресурси розподіляються рівномірно, що може бути неефективним у разі, коли деякі абоненти вимагають більш високих швидкостей передачі даних, ніж інші.

Симетричні оптичні комутатори мають рівну кількість вхідних (M) і вихідних (N) портів (MxN, де M=N) і можуть мати розміри від 2x2 до 320x320 і більше. Симетричні комутатори зазвичай засновані на неблокованій комутаційній матриці, що забезпечує шлях від будь-якого входу до будь-якого виходу, що дає змогу під'єднуватися за принципом "від будь-якого до будь-

якого". Хоча можливість під'єднання "будь-який до будь-якого" дає змогу під'єднувати всі порти одночасно, один вхід можна під'єднати тільки до одного виходу. Тому, якщо всі порти під'єднані одночасно і потрібно змінити з'єднання, для цього необхідно вимкнути інше з'єднання.

З погляду застосування, симетричні оптичні комутатори корисні та краще підходять для динамічної топології, де потрібна часта зміна підключення до всіх мережевих пристроїв. Що означає, що швидкість передачі даних у напрямку від абонента до оператора (upstream) дорівнює швидкості в напрямку від оператора до абонента (downstream).

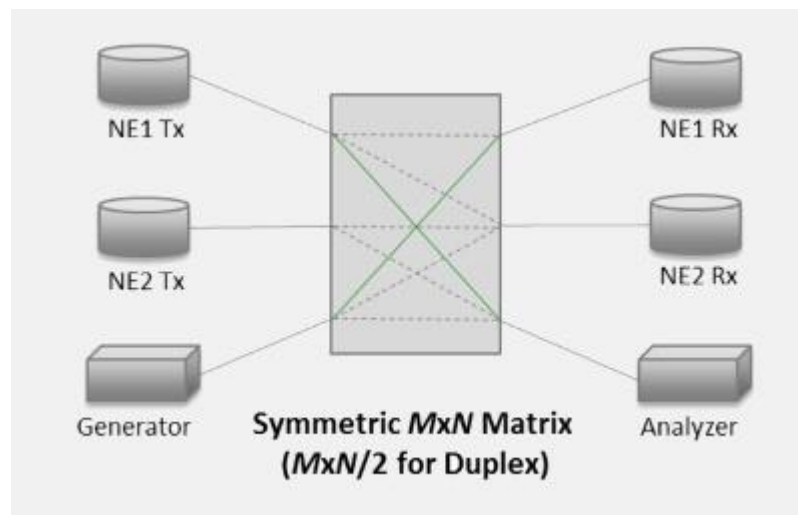


Рисунок 4.9 - Симетричне підключення

GPON (Gigabit Passive Optical Network) є несиметричною технологією передачі даних по оптичному волокну. Вона забезпечує вищу пропускну здатність у напрямку від центрального вузла до кінцевих користувачів (downstream) порівняно зі зворотним напрямком (upstream). Зазвичай співвідношення швидкостей downstream до upstream у GPON становить 4:1 або 2.5:1.

У той час як downstream використовується для передачі даних від центрального вузла до кінцевих користувачів (наприклад, для завантаження відео, веб-сторінок та інших контентів), upstream використовується для

передачі даних від користувачів до центрального вузла (наприклад, для відправки файлів, відеоконференцій та інших запитів).

На відміну від цього, симетричні технології, як-от XGS-PON (eXtended Gigabit Passive Optical Network), забезпечують рівні швидкості передавання даних як у downstream, так і в upstream, що корисно у випадках, коли користувачі мають високі вимоги до обох напрямків передавання даних, наприклад, під час використання інтерактивних застосунків і хмарних сервісів.

XGS-PON представляє оновлений стандарт пасивних оптичних мереж (PON), який забезпечує симетричну передачу даних на швидкості 10 Гбіт/с. Цей стандарт входить до сімейства G-PON (гігабітних PON-стандартів), де G-PON означає Gigabit PON або 1 Gigabit PON. У терміні XGS-PON, буква X являє собою цифру 10, а буква S позначає "симетричний". Таким чином, XGS-PON є симетричною пасивною пасивною оптичною мережею з пропускною спроможністю 10 Гбіт/с. Порівняно, попередня несиметрична версія стандарту, XG-PON, мала обмеження в 2,5 Гбіт/с у висхідному напрямку (upstream).

4.3.1 Стандарт XGS-PON

Стандартизація в розробці та використанні PON здійснюється від самого початку відповідно до міжнародних стандартів. Для сімейства G-PON ці стандарти визначаються Міжнародним союзом електрозв'язку, в той час як для Ethernet PON (E-PON) застосовуються стандарти Інституту інженерів з електротехніки та радіоелектроніки (IEEE). У 2016 році був представлений новий стандарт XGS-PON, описаний як симетрична пасивна оптична мережа доступу з пропускною спроможністю 10 Гбіт/с. Цей стандарт, описаний у рекомендації ITU-T G.9807.1, призначений для використання в різних сценаріях, таких як домогосподарства, підприємства, опорні мобільні мережі та інші.

XGS-PON спирається на компоненти фізичного рівня, представлені в XG-PON, для створення повноцінного симетричного варіанту G-PON з підтримкою 10 Гбіт/с. Це означає, що обидва стандарти можуть використовувати одні й ті самі компоненти оптичних трансиверів. Стандарти протокольного рівня для XGS-PON відображені в стандарті NG-PON2, який описаний в ІТУ-Т G.989.3.

Хоча фізичні характеристики оптоволокна і формат даних у XGS-PON залишаються незмінними порівняно з початковим стандартом G-PON, у цій технології використовуються інші довжини хвиль. Для передавання даних вниз використовується довжина хвилі 1577 нм, тоді як для передавання даних вгору використовується довжина хвилі 1270 нм. Це зумовлено необхідністю забезпечення спільного використання декількох служб PON в одній мережі, щоб забезпечити безперебійне оновлення та міграцію служб або спільне використання мережі різними постачальниками послуг при наданні різного рівня обслуговування, наприклад, для бізнесу і домашніх користувачів.

Довжини хвиль, що використовуються в XGS-PON, відрізняються від інших стандартів, таких як G-PON і NG-PON2. Однак завдяки діапазону передачі в PON, який становить від 1260 до 1650 нм, можливе одночасне використання стандартів G-PON, XGS-PON і NG-PON2 в одній оптоволоконній мережі. Унікальність XGS-PON полягає в тому, що, будучи розвитком стандарту XG-PON з метою забезпечити симетричність, він є єдиним випадком, коли обидва стандарти використовують одні й ті самі довжини хвиль в обох напрямках - до абонентського пристрою і від нього. Наразі більшість операторів, які розглядають впровадження послуг 10G, віддають перевагу XGS-PON.

Використовуючи один або кілька каскадних спліттерів, сигнал, спрямований від OLT у напрямку до кінцевих пристроїв (ONT) у низхідному потоці, може бути розділений для обслуговування до 128 ONT. У стандартах IEEE, таких як E-PON і 10G-EPON, ONT також відомий як блок оптичної мережі (ONU).

Істотне зниження вартості пристроїв ONT/ONU на 10 Гбіт завдяки інноваціям у методах монтажу, оптиці та конструкції мікросхем тепер прирівнює їх до рівня вартості пристроїв ONT/ONU на 1 Гбіт. Поширення XGS-PON із загальним використанням апаратних елементів знизить вартість обладнання завдяки "економіці масштабу". Нове покоління ONT XGS-PON стане більш гнучким для застосування в різних сценаріях, як-от FTTH, підприємства та 5G.

Здатність передачі даних на рівні 10 Гбіт/с в обох напрямках і сумісна архітектура роблять XGS-PON перспективним рішенням для високошвидкісного передавання голосу, даних та Інтернету на тривалий період. Зростаюча популярність відеоконференцій, ігор і хмарного зберігання робить вимоги до швидкостей висхідної передачі не менш актуальними.

XGS-PON також може бути використаний в інших сценаріях, таких як передача обробленого відеосигналу 5G і з'єднання контролера БС і радіочастини. Завдяки здатності XGS-PON співіснувати з G-PON на одному оптоволокні без змін у пасивній архітектурі та підтримувати більш високі коефіцієнти розподілу, він являє собою логічне та економічно ефективне рішення для модернізації мережі.

4.4 Гібридні рішення

В умовах постійно зростаючих вимог до пропускної спроможності мереж зв'язку і необхідності забезпечення високоякісних послуг кінцевим користувачам, гібридні рішення, що об'єднують технології GPON і XGS-PON, надають ефективні інструменти для оптимізації інфраструктури пасивного оптичного доступу (PON).

XGS-PON являє собою оновлений стандарт пасивних оптичних мереж (PON), який забезпечує симетричну передачу даних зі швидкістю 10 Гбіт/с. Цей стандарт входить до сімейства "гігабітних" PON-стандартів, також відомих як G-PON.

Прикладом реалізації гібридного рішення може слугувати комбіноване використання OLT для обох технологій. На рівні OLT досягається інтеграція, що дає змогу обслуговувати абонентів, які використовують як GPON, так і XGS-PON, на одному і тому ж обладнанні.

Для цього OLT може бути конфігурований таким чином, щоб надавати слоти або порти, що забезпечують підключення як до GPON, так і до XGS-PON. Це дає змогу провайдерам зв'язку гнучкіше керувати ресурсами та підлаштовувати мережу під конкретні потреби кінцевих користувачів.

Переваги такого підходу включають можливість міграції мережі до нових технологій поетапно, мінімізуючи витрати на оновлення обладнання. Гібридне рішення також спрощує процеси управління та обслуговування, оскільки адміністраторам не потрібно підтримувати два окремі набори обладнання для двох різних технологій.

Це також відкриває можливості для надання різних тарифних планів і послуг, адаптованих до потреб різноманітних категорій абонентів. Наприклад, абоненти з підвищеними вимогами до швидкості передавання даних можуть бути під'єднані до портів XGS-PON, тоді як більш стандартні потреби обслуговуються через порти GPON.

Таким чином, гібридні рішення GPON і XGS-PON на рівні OLT надають гнучкість і ефективність, необхідні для успішного розвитку і вдосконалення інфраструктури пасивного оптичного доступу.

ВИСНОВКИ

До середини листопада 2022 року, Україна не відчувала масштабних перебоїв в електропостачанні. Однак ситуація змінилася після атак російських військ на енергетичну інфраструктуру країни, що призвело до першого значного відключення електрики. Ці агресивні дії завдали серйозної шкоди електричним мережам, унаслідок чого багато українців опинилися без світла на тривалий період.

У цей час в Україні йшов розвиток технології GPON, що йде паралельно з EPON. Після листопадових подій спостерігалось значне зростання кількості абонентів GPON. Ця технологія демонструвала більшу незалежність від електропостачання порівняно з EPON, що стало особливо актуально в умовах блекаутів. Важливою перевагою GPON є те, що основні технічні вузли цієї мережі обладнані системами безперебійного живлення, що забезпечують безперервну роботу цілодобово.

Крім того, GPON вирізняється високою пропускнуою здатністю, що дає змогу одночасно обслуговувати велику кількість користувачів без втрати якості та швидкості з'єднання. На відміну від деяких традиційних технологій, які можуть страждати від погіршення продуктивності в разі високого завантаження мережі, GPON підтримує стабільне й ефективне з'єднання навіть за інтенсивного використання, що особливо важливо для мереж із великою кількістю користувачів, як-от домашні або офісні мережі.

У дипломній роботі було проведено аналіз економічної ефективності технології GPON, яка широко використовується для надання високошвидкісного доступу в інтернет і мультимедійних послуг. У рамках дослідження було розглянуто поточні експлуатаційні витрати та потенційну вигоду від технології.

Одним із запропонованих шляхів поліпшення є модернізація обладнання на стороні OLT - найважливішого елемента в GPON-архітектурі. Заміна наявних плат на OLT новими моделями може призвести до зменшення

загасання сигналу, що, зі свого боку, дасть змогу підвищити якість зв'язку та розширити сферу обслуговування без додаткових витрат на прокладання нових ліній.

Також у дипломі було досліджено перспективні напрямки розвитку оптичних мереж, зокрема, використання гібридних систем і технологій WDM-TDM-PON. Гібридні мережі передбачають комбінацію різних підходів і технологій передавання даних для оптимізації продуктивності та вартості. WDM-TDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-Time Division Multiplexing Passive Optical Network) - це технологія, що об'єднує переваги WDM, що дає змогу передавати кілька сигналів одним оптичним волокном із використанням різних довжин хвиль, та TDM, яка передбачає поділ часу доступу до каналу між різними користувачами. Ці пропозиції спрямовані на поліпшення пропускної здатності мереж, зниження витрат на їхнє обслуговування та підвищення задоволеності користувачів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. CISCO, The Zettabyte Era: Trends and Analysis, May, 2015, Available at http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/VNI_Hyperconnectivity_WP.pdf.
2. CISCO, Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019, February 15, 2014, Available at http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.pdf.
3. M.E. Abdalla, S.M. Idrus and A.B. Mohammad, "Hybrid TDM-WDM 10G-PON for high scalability next generation PON", 8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013, pp. 1448-1450.
4. Ming Zhu, Liang Zhang, Cheng Liu, Shu-Hao Fan and Gee-Kung Chang, "Delivery of Wireless and Wired Services Using a Single-drive Mach-Zehnder Modulator for Bidirectional Radio-over-Fiber Systems", 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July, 2012, pp. 90-91.
5. Priya Dane and Hemani Kaushal, "Characterization of RoF GPON performance for different modulation schemes", Tenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), July, 2013, pp. 1-6.
6. V. Polo, A. Martinez, J. Marti, F. Ramos, A. Griol and R. Llorente, "Simultaneous baseband and RF modulations scheme in Gbit/s millimetre-wave Wireless-fibre networks", International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), September, 2000, pp. 168-171.
7. Tomotada Kamisaka, Toshiaki Kuri and Ken-ichi Kitayama, "Simultaneous modulation and fiber-optic transmission of 10-Gb/s baseband and 60-GHz-band radio signals on a single wavelength", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 49, Issue 10, October, 2001 pp. 2013-2017.

8. Norashidah Md Din, Nurul Asyikin MdRadzi, Sajaa Kh Sadon and Mohammed Hayder Al-Mansoori, "Approaches in Dynamic Bandwidth Allocation in Passive Optical Network Systems", 2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP), October, 2013, pp. 10-14.
9. Gerd Keiser, FTTX Concepts and Applications, Wiley-IEEE Press, Hoboken, New Jersey, 2006, pp. 155-169.
10. Huawei, Next-Generation PON Evolution, 2010, Available at <http://www.huawei.com/de/static/HW-077443.pdf>.
11. H. Akimaru, K. Kawashima, Teletraffic - Theory and Applications, Springer-Verlag, 1993.