ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «СИСТЕМА PON З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ РЕЗЕРВУВАННЯ»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Комп'ютерна інженерія
(назва)

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

_____ *Захар Щербина*
(підпис) *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. КІД-41
Захар ЩЕРБИНА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник: Ірина КУЗЬМІЧ
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Рецензент:
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ – 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра 123 Комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітньо-професійна програма Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Комп'ютерної інженерії
_____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА
_____
«_____» _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Щербина Захар Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система PON з використанням методів резервування
_____

керівник кваліфікаційної роботи ІРИНА Кузьміч.,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «24» лютого 2025р. № 56

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «5» червня 2025р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література;
_____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Аналіз можливостей пасивних оптичних мереж (Pon)
2. Показники надійності систем Pon
3. Підвищення надійності систем Pon
5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
6. Дата видачі завдання «24» лютого 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Добір науково-технічної літератури. Збір даних.	25.02-15.03.2025	Виконано
2	Стан і перспективи розвитку мереж PON	15.03-03.04.2025	Виконано
3	Особливості принципів організації резервних систем PON	03.04-21.04.2025	Виконано
4	Показники надійності систем PON	21.04-09.05.2025	Виконано
5	Висновки за результатами аналізу	09.05-14.05.2025	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	14.05-15.05.2025	Виконано
7	Розробка презентації	15.05-17.05.2025	Виконано
8	Передзахист	27.05-29.05.2025	Виконано
9	Здача в деканат	02.06-05.06.2025	Виконано

Студент Захар ЩЕРБИНА

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Ірина КУЗЬМІЧ

(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської роботи: 66 стор., 19 рис., 14 джерел.

Об'єкт дослідження – процес функціювання мережі PON.

Предмет дослідження – пасивна оптична мережа.

Мета роботи – провести необхідні дослідження, спрямовані на формування мережі PON із застосуванням резервування.

Методи дослідження – методи резервування; аналітичного та імітаційного моделювання.

Короткий зміст роботи: У роботі детально проаналізовано принципи функціювання пасивних оптичних мереж (PON) та їх різновиди, зокрема технології APON/BPON, GPON і Ethernet PON (EPON). Розглянуто приклади схем доставки даних і послуг у мережах PON, а також проведено порівняння переваг і недоліків архітектури PON відносно альтернативних підходів. Досліджена оцінка показників надійності систем PON. Розглянуто основні показники надійності об'єктів, що не відновлюються, такі як ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмови, щільність і інтенсивність розподілу відмов, середній час напрацювання на відмову, а також показники надійності відновлюваних об'єктів. У роботі проаналізовано комплекс заходів і технічних рішень, спрямованих на підвищення надійності системи PON як на етапах проектування і виробництва, так і під час експлуатації. Розглянуто поширені методи резервування. Проведено аналіз трьох типових архітектур системи з резервуванням: часткове резервування в центральному вузлі, часткове резервування абонентського обладнання та повне резервування всієї системи PON. Досліджено методики резервування в мережах PON в умовах, що змінюються.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПАСИВНІ ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ (PON), ДАНІ, ПОСЛУГИ, APON, GPON, EPON, ПОТІК, ПРЯМИЙ, ЗВОРОТНИЙ, ТРАФІК, НАДІЙНІСТЬ, ПОКАЗНИК, ГОТОВНІСТЬ, РЕЗЕРВУВАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП 9

РОЗДІЛ 1. ПАСИВНІ ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ (PON): СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ 10

1.1 Принципи дії PON 10

1.2 Технологія APON/BPON 23

1.3 Технологія GPON 26

1.4 Ethernet PON (EPON) 27

1.5 Протокол управління багатоточковим обміном (MPCP) 33

1.6 Відповідність EPON архітектурі 802 38

1.7 Емуляція схеми точка-точка (PtPE) 39

1.8 Емуляція спільно використовуваного середовища (SME) 41

1.9 Комбінування режимів PtPE і SME 42

1.10 Приклади схем доставки даних і послуг в мережах PON 44

1.13 Переваги і недоліки архітектури PON 49

РОЗДІЛ 2. ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ PON 51

2.1 Основні поняття та визначення 51

2.2 Показники надійності об’єктів, що не відновлюються 56

2.3 Показники надійності відновлюваних об’єктів 63

РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ PON 66

3.1 Підвищення надійності на етапі проектування та розробки 66

3.2 Підвищення надійності при виготовленні апаратури систем PON та на етапі технічної експлуатації 67

3.3 Резервування як один з ефективних методів підвищення надійності устаткування системи PON 67

3.4 Надійність і резервування в PON 69

3.4.1 Часткове резервування з боку центрального вузла 69

3.4.2 Часткове резервування з боку абонентського вузла 71

3.4.3 Повне резервування системи PON 71

ВИСНОВКИ 73

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 75

ВСТУП

Засоби зв’язку нині – це невід’ємна частина сучасного суспільства. Від них залежать як можливості у побуті, так і у виробництві, у дослідженнях, у роботі, безпеці, освіті, медицині тощо. Отже, надійність цих засобів, їх швидкодія, здатність забезпечувати якісний обмін інформацією є тим, від чого залежить життєдіяльність та подальший розвиток мільярдів людей.

Інформаційні системи сьогодні мають забезпечувати не лише високу швидкість і точність обробки та передавання даних, але й стабільність роботи навіть за несприятливих умов. Це створює підвищені вимоги до надійності та ефективності телекомунікаційних технологій.

Зокрема, широке впровадження оптичних систем зв’язку обумовлене їх високими пропускними здатностями та енергетичною ефективністю. Серед них пасивні оптичні мережі (PON) посідають важливе місце, оскільки дозволяють реалізувати доступ до мережі з мінімальними експлуатаційними витратами за рахунок використання пасивних компонентів. Однак попри технологічні переваги, такі мережі залишаються вразливими до впливу відмов окремих елементів, що може призводити до зниження якості обслуговування або повного припинення доступу.

Жодна система не є абсолютно надійною. Будь-яке технічне обладнання з часом піддається зношуванню, а ймовірність відмови є невід’ємною характеристикою його експлуатації. Саме тому актуальним є питання забезпечення надійності систем PON, що включає не лише оцінювання працездатності мережі в умовах відмов, а й розробку методів їх компенсації, таких як резервування ключових компонентів.

У цій кваліфікаційній роботі розглядається проблема забезпечення надійності в пасивних оптичних мережах, зокрема шляхом аналізу методів резервування.

РОЗДІЛ 1. ПАСИВНІ ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ (PON): СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

1.1 Принципи дії PON

Концептуальна особливість архітектури пасивної оптичної мережі (PON) полягає в застосуванні єдиного трансивера в оптичному лінійному терміналі (OLT) для організації обміну даними з множиною абонентських терміналів (ONT). Кількість користувацьких пристроїв, що можуть бути підключені до одного трансиверного модуля в OLT, визначається параметрами енергетичного балансу мережі та максимально допустимою швидкістю передавання сигналів, підтримуваною обладнанням. Для передавання інформаційного потоку від центрального вузла до абонентських пристроїв, тобто низхідного, зазвичай застосовується хвиля довжиною 1550 нм. Технологія описана в першій версії рекомендації ITU G983.1 від 1998 р. [6]. У протилежному ж напрямку висхідний потік, який формується об’єднанням переданих від кількох ONT даних, транслюється на хвилі довжиною 1310 нм. Оптичні термінали обох типів – OLT та ONT – обладнані WDM-мультиплексорами, які здійснюють розподіл передавальних та приймальних каналів. Принципова схема реалізації цього механізму наведена на рисунку 1.1.

Низхідний потік. На фізичному рівні оптичного сигналу передавання даних від OLT до ONT реалізується як широкомовна трансляція. Абонентські термінали самостійно ідентифікують релевантні їм фрагменти потоку, орієнтуючись на адресну інформацію, вбудовану в кадри. Такий підхід фактично відповідає принципу функціонування розподіленого демультиплексора.

Висхідний потік. Передавання даних від усіх абонентських терміналів (ONT) до оптичного лінійного термінала (OLT) здійснюється в межах однієї довжини хвилі з використанням технології TDMA (Time Division Multiple Access), яка передбачає розподіл каналу передачі за часовими інтервалами. З метою запобігання конфліктам сигналів, що надходять від різних ONT, кожному пристрою призначається окремий часовий слот, сформований з урахуванням індивідуальних

затримок сигналу, обумовлених варіаціями у відстані до центрального вузла. Контроль за цим розподілом здійснюється протоколом рівня доступу TDMA MAC.

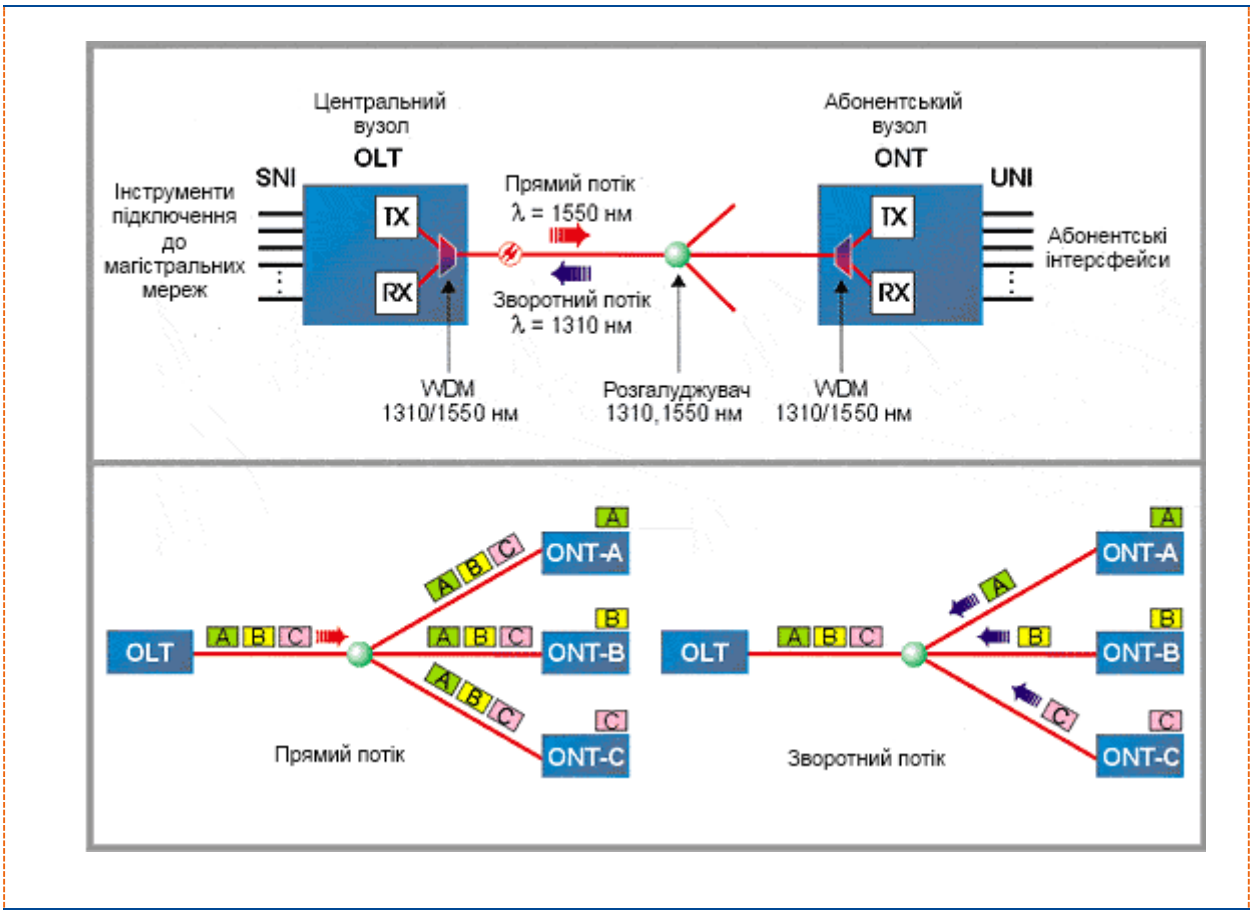


Рис. 1.1. Основні елементи архітектури PON і принцип дії

Пасивна оптична мережа (PON) являє собою інфраструктуру оптичного доступу, що забезпечує ефективну трансмісію широкосмугового контенту – зокрема голосових сервісів, цифрових даних і відеосигналу – між центральним оптичним вузлом (OLT, Optical Line Terminal) і множиною віддалених користувацьких пристроїв ONU (Optical Network Units). Однією з принципових рис архітектури PON є відсутність активних компонентів із функцією оптоелектронного перетворення сигналів у транспортному середовищі. Замість них у структурі використовуються винятково пасивні елементи – волоконно-оптичні розгалужувачі або суматори потоку.

На противагу цьому, активні оптичні мережі (AON), зокрема рішення, що базуються на технологіях Sonet/SDH, передбачають обов'язкову конверсію оптичного сигналу в електричний у кожному мережевому вузлі та зворотне перетворення. У конфігурації PON зазвичай реалізується топологія дерева, шини або кільця, що дозволяє консолідувати трафік від кількох десятків ONU (до 32 пристроїв) і направляти його до центрального офісного вузла (CO, Central Office).

Як і мережі на основі SONET/SDH, PON функціонує на фізичному рівні (Layer 1) моделі передачі даних. Традиційно у волоконно-оптичних мережах домінували саме SONET/SDH-стандарти, що передбачають регенерацію сигналу в кожному вузлі кільцевої структури. Ці технології були ефективними для магістральних і регіональних мереж, але виявляються менш придатними для побудови мереж доступу через вищу вартість і складність.

На відміну від них, PON постає як економічно обґрунтована альтернатива для розгортання оптоволоконних мереж доступу [5], зокрема в межах міських інфраструктур, де вона може діяти як «збірне оптичне кільце», не вимагаючи активних елементів. Завдяки відсутності потреби оптоелектронної регенерації сигналу, пасивні мережі мають нижчі капітальні витрати, оскільки оптичне передавання відбувається безпосередньо до клієнтського обладнання. Масштабування такої мережі можливе поступово, із модифікацією (наприклад, додаванням нових ONU в разі необхідності), тоді як в AON усі активні вузли повинні бути попередньо встановлені, оскільки вони виконують функції підсилення та регенерації сигналів (див. рис. 1.2).

Для подальшої оптимізації витрат може застосовуватись мультиплексування за довжиною хвилі (WDM), що дозволяє ще більш ефективно використовувати оптичний ресурс. При цьому важливо зауважити, що PON не є частиною магістральної інфраструктури. У системах типу SONET/SDH, побудованих із застосуванням WDM, мультиплексування та демультиплексування необхідно реалізовувати на кожному вузлі, через що зростає складність та вартість системи. Топологія типу точка-мультиточка, яка притаманна PON, добре підходить для організації широкомовної трансляції відеоконтенту. Як аналоговий, так і цифровий

відеосигнал може бути включений у загальний потік, що передається за принципом поділу в часі (TDM). Ще однією важливою відмінністю між PON та системами SONET/SDH є можливість побудови асиметричних каналів. Наприклад, PON може здійснювати широкомовне передавання на швидкості OC-12 [622 Мбіт/с] до абонентів, тоді як зворотний канал може працювати на швидкості OC-3 [155 Мбіт/с]. Така асиметричність дозволяє застосовувати більш доступні ONU, оснащені менш дорогими трансиверами. Своєю чергою, SONET/SDH ґрунтуються на симетричному принципі – усі мережеві вузли в кільці OC-12 повинні мати підтримку цієї ж смуги пропускання.

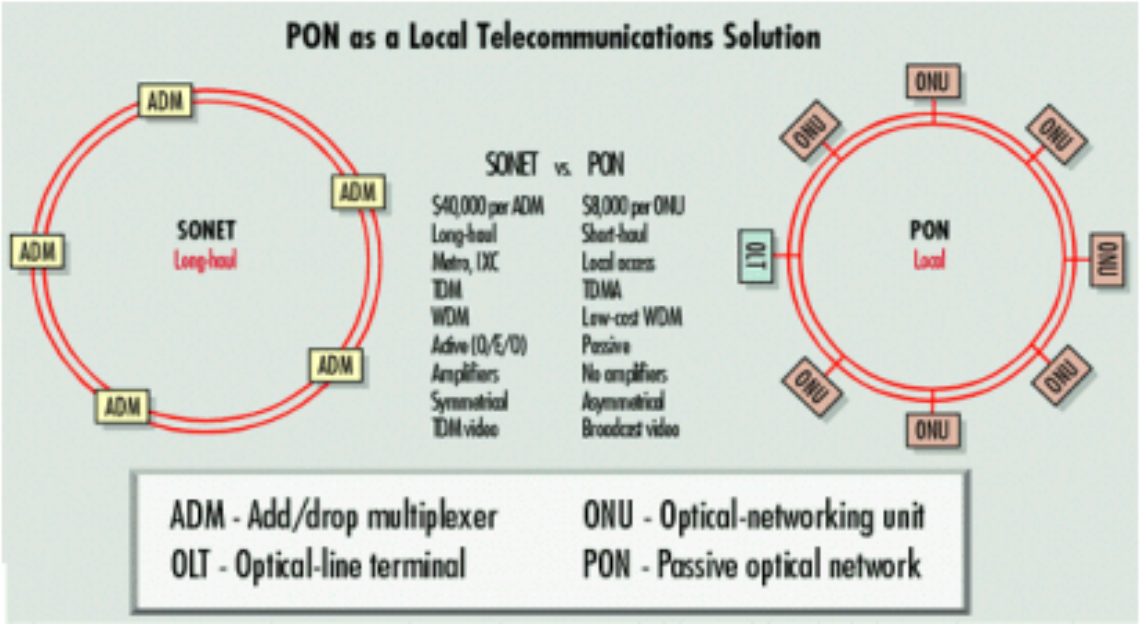


Рис. 1.2. Зіставлення мережі Sonet і PON [3]

У контексті локального застосування архітектура PON демонструє підвищену стійкість до збоїв порівняно з мережами типу SONET/SDH. Зокрема, оскільки вузли PON не належать до активних елементів транспортної мережі, їх знеструмлення не впливає на загальну працездатність системи. Натомість у мережах SONET/SDH кожен вузол виконує функцію регенерації сигналу, тому вихід з ладу одного з них може спричинити порушення роботи всієї лінії зв’язку. З огляду на те, що провайдери не можуть гарантувати безперебійне живлення всіх віддалених терміналів, перевага PON у цьому аспекті є принципово важливою.

У мережах PON застосовується мультиплексування з поділом у часі (TDM) для організації обміну даними між оптичними терміналами ONU (Optical Network Unit) і головним пристроєм OLT (Optical Line Terminal). Формат кадрів, які передаються в цій архітектурі, зображено на рисунку 1.3. На практиці це стандартні Ethernet-пакети, що мають специфічну мультикаст-адресу призначення та унікальний ідентифікатор типу протоколу Ethertype. Мультикаст-адреса типу 0180C20002 та значення поля Ethertype сигналізують, що кадр належить до так званих «повільних протоколів» (slow protocols), визначених стандартом IEEE 802.3.

Одним із таких протоколів є LACP (Link Aggregation Control Protocol). Типи протоколів у цьому класі кодуються за допомогою спеціального підтипу; значення «3» зарезервовано для протоколу обслуговування та адміністрування (OAM – Operations, Administration and Maintenance). Передавання даних у протоколі OAM відбувається за допомогою службових кадрів OAMPDU (Operations, Administration and Maintenance Protocol Data Units), які інтерпретуються на рівні MAC підсистеми завдяки використанню зареєстрованої MAC-адреси. Більшість інформації в OAMPDU структуровано у вигляді TLV-блоків (Type-Length-Value). Перший байт містить код типу, що визначає спосіб декодування інформації клієнтом OAM. Другий байт вказує довжину інформаційного поля, що дає змогу програмі пропускати невідомі типи даних. Решта байтів містять безпосередньо інформаційний вміст.

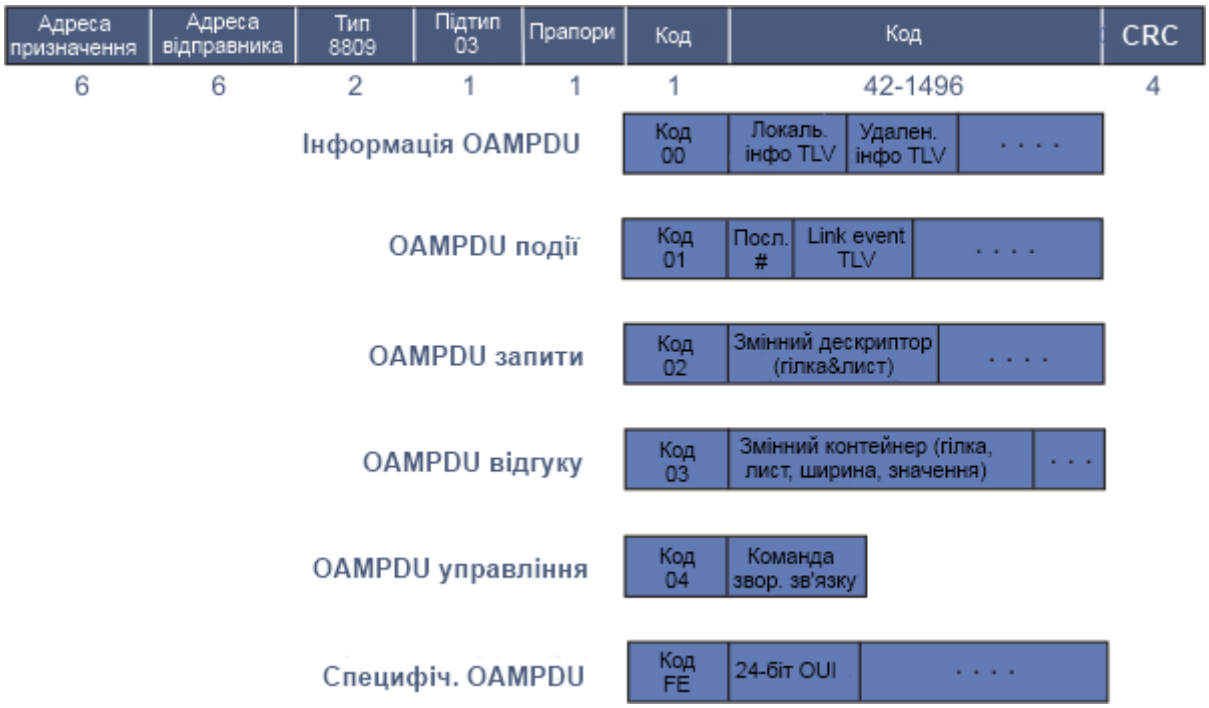


Рис. 1.3. Формат пакетів PON [4]

Із впровадженням дуплексного стандарту Ethernet IEEE 802.3X потреба в мінімальній довжині кадру, яка раніше становила 64 байти, фактично втратила свою актуальність. Згодом, із появою технологій Fast Ethernet (100BASE-FX/TX), де передавання сигналу на фізичному рівні реалізоване за синхронним принципом – на відміну від асинхронного підходу, що застосовувався в Ethernet зі швидкістю 10 Мбіт/с, – виявилися віджилими також інтервал між кадрами (12 байтів) і подовжена преамбула (8 байтів). Технологія Ethernet Passive Optical Network (EPON) ґрунтується на ефективному використанні доступної пропускної здатності. Передавання Ethernet-кадрів мережею EPON здійснюється без їхньої фрагментації, що дозволяє зберігати цілісність інформаційної структури. Проте це не означає повну відсутність змін у форматі кадру. Зокрема, до стандартної преамбули Ethernet-дейтаграми (див. рис. 1.4, а) додаються додаткові службові поля, які модифікують заголовок кадру (див. рис. 1.4, б), а саме:

- SOP (Start of Packet) – 1 байт, що сигналізує про початок кадру.
- Резервне поле – 4 байти, призначені для майбутнього розширення або системної інформації.

● LLID (Logical Link Identifier) – 2 байти, що ідентифікують конкретний логічний канал у межах EPON. Актуальною стає проблема визначення кількості LLID, що можуть бути асоційовані з одним вузлом користувача ONT: допустимий як єдиний, так і множинний підхід. LLID є ключовим елементом для реалізації віртуальних з'єднань типу «точка-точка» або «точка-мультиточка». Перший біт поля визначає тип трафіку (одноадресний або груповий), решта 15 біт містять унікальну адресу вузла EPON.

● CRC (Cyclic Redundancy Check) – 1 байт, що виконує функцію контролю цілісності переданих даних відповідно до специфікації IEEE P802.3ah.



Рис. 1.4. Більш детальний опис полів кадрів [13]

Після виходу кадру з мережі EPON його преамбула набуває стандартного формату – спеціальний тег видаляється. Зокрема, у низхідному потоці оптичний лінійний термінал (OLT) модифікує преамбулу кожного кадру формату 802.3, що надходить до PON: до початкової преамбули додається спеціальний тег (ідентифікатор) LLID. Цей тег згодом вилучається на відповідному підрівні вузла ONT, де здійснюється відновлення преамбули до стандартного вигляду. В умовах штатної експлуатації, тобто після завершення процедури реєстрації, вузол ONT

обробляє лише ті кадри, преамбула яких містить LLID, що збігається з власним ідентифікатором пристрою. Усі інші поля кадру EPON відповідають структурі типового Ethernet-кадру та мають такі призначення:

- DA (Destination Address) – 6 байтів, що вказують MAC-адресу приймача; вона може бути унікальною (unicast), груповою (multicast) або широкомовною (broadcast).
- SA (Source Address) – 6 байтів, які вказують MAC-адресу відправника.
- L/T (Length/Type) – 2 байти, що містять значення довжини або типу кадру.
- Поле даних – сегмент змінної довжини, що містить передавану інформацію.
- PAD (padding) – поле вирівнювання, яке додається у разі необхідності для забезпечення мінімального допустимого розміру кадру.
- FCS (Frame Check Sequence) – 4 байти, що містять контрольну суму, обчислену методом циклічного надлишкового кодування (CRC).
- opcode (optional code) – 2 байти, що вказують тип керуючого кадру. Залежно від значення цього поля розрізняють два типи службових повідомлень: кадри типу GATE, які формуються OLT, та кадри типу REPORT, що створюються ONT.
- TS (Time Stamp) – 4 байти, які містять часову позначку, сформовану відправником.
- message – 40 байтів службової інформації, необхідної для функціонування протоколу MPCP.

На рис. 1.5 показано взаємодію субрівнями мереж PON.

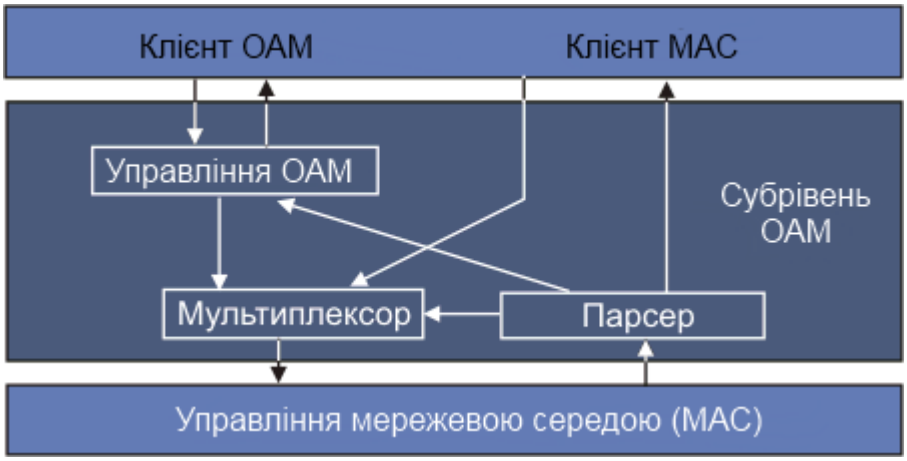


Рис. 1.5. Взаємодія субрівнями PON [4]

Можливі практичні схеми підключення клієнтів до мережі показані на рис. 1.6.

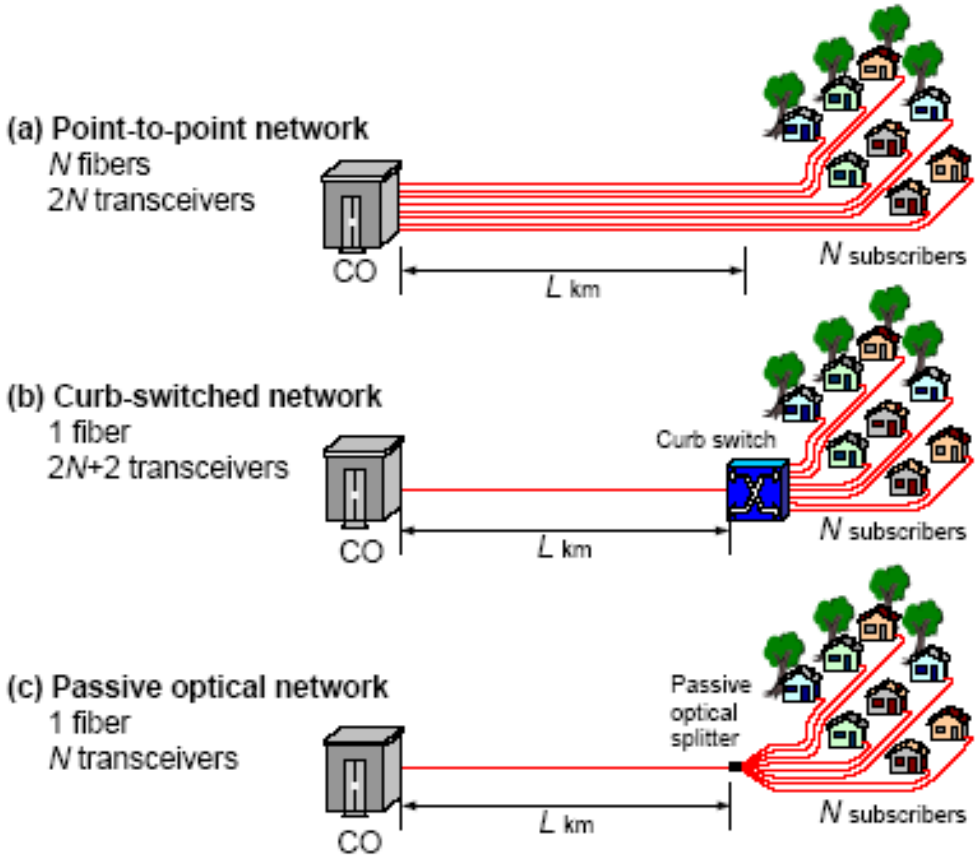


Рис. 1.6. Схеми підключення клієнтів до мережі [3]

На схемах представлено кілька випадків з наявністю N клієнтів, розташованих на відстані L км від центральної станції. У варіанті (a), що передбачає використання топології типу «точка–точка», потрібно задіяти 2N трансиверів та N * L метрів оптичного волокна (за умови, що одне волокно забезпечує передавання даних у двох напрямках; однак на практиці для кожного напрямку зазвичай застосовують окремі волокна).

Щоб зменшити сумарну довжину волокон, можна використовувати концентратор у безпосередній близькості від клієнтів. Унаслідок цього сумарна довжина волокна становитиме L км (якщо знехтувати довжиною кабелів від концентратора до клієнтів), але це потребує збільшення числа трансиверів до 2N+2, оскільки в мережі з’явиться ще один канал зв’язку (рис. 1.6, b). Тут треба також забезпечити безперебійне живлення для концентратора. На рис. 6c концентратор

замінений пасивним оптичним перехідником. У цьому варіанті потрібно тільки N+1 трансиверів і L км волокна.

Необхідно зауважити, що пасивне розгалуження світлового потоку призводить до відповідного падіння потужності світлового сигналу. Для ідеального з'єднувача 2x2 падіння потужності становитиме 3 дБ. Недосконаліть з'єднань призводить до додаткових втрат світла, які можуть становити від 0,1 до 1,0 дБ. Схема 4-каскадного об'єднувача, представленого на рис. 1.7, забезпечить надходження клієнту лише 1/16 вхідного світлового потоку. Унаслідок цього вихідна потужність передавального лазера має бути в 16 разів більшою.

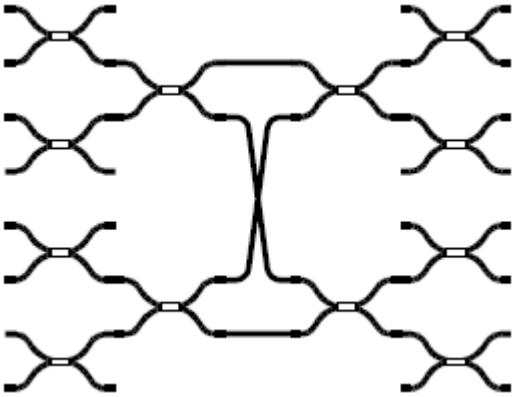


Рис. 1.7. Схема 4-каскадного оптичного з'єднувача

Пасивні оптичні компоненти з єдиним вхідним каналом, що виконують функцію розгалудження сигналу, називають розподілювачами (splitters), тоді як елементи з одним виходом – змішувачами (combiners). Типові варіанти топологічної організації оптичної мережі наведено на рисунку 1.8.

У межах пасивної оптичної мережі (PON) передавання даних відбувається виключно між двома основними елементами – оптичним лінійним терміналом (OLT – Optical Line Terminal) та оптичним мережевим вузлом (ONU – Optical Network Unit). OLT встановлюється в центральному офісі оператора зв'язку (CO) та виконує роль інтерфейсу між мережею доступу і транспортною інфраструктурою, зокрема, між міською регіональною мережею (MAN) або глобальною мережею (WAN), такою як Інтернет. ONU, залежно від архітектурної

схеми мережі, може монтуватися безпосередньо в приміщенні користувача (як у випадку FTTH – Fiber to the Home – «волокно до оселі» або FTTB – Fiber to the Building – «волокно до будівлі»), або ж розташовуватися на проміжному пункті поблизу кінцевого абонента, як це реалізовано в архітектурі FTTC – Fiber to the Curb – «волокно до бордюру», де подальша передача сигналу до користувача здійснюється через мідний сегмент.

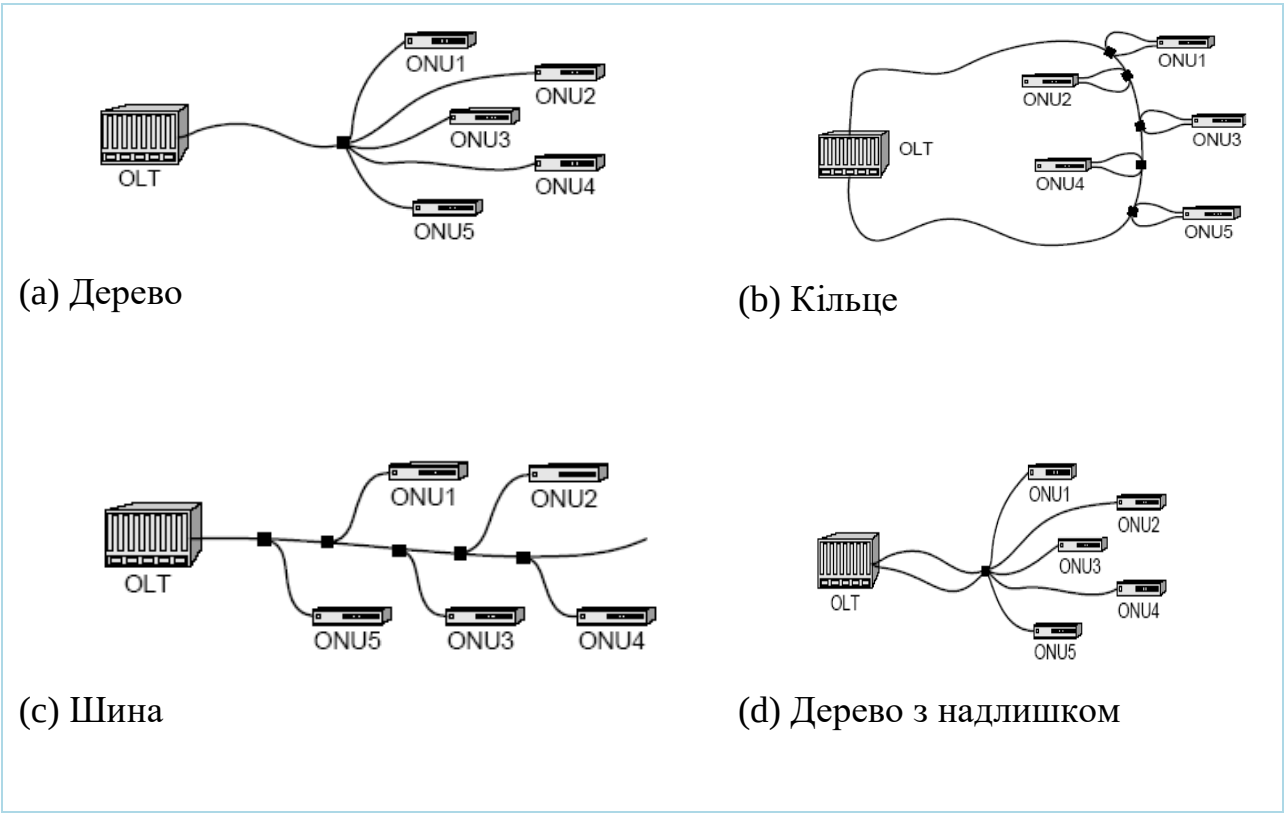


Рис. 1.8. Можливі топології побудови мережі PON [11]

Серед ключових переваг пасивних оптичних мереж (PON) варто виокремити низку технічних і економічних аспектів. Зокрема, архітектура PON забезпечує ефективну роботу на відстанях до 20 км між центральним вузлом зв’язку (CO) та абонентським терміналом, що дозволяє обслуговувати значні території без необхідності в додаткових активних елементах мережі. Завдяки цьому також скорочуються загальні витрати на волоконно-оптичну інфраструктуру, оскільки зменшується довжина необхідного кабелю. PON забезпечує високу пропускну здатність – до 10 Гбіт/с згідно зі стандартом IEEE P802.3av – і є ефективним рішенням для мультикаст-доставки контенту, зокрема аналогових і цифрових

відеосигналів. Відсутність активних комутаційних пристроїв у точках розгалуження не лише знижує експлуатаційні витрати, а й суттєво спрощує обслуговування мережі. У таких випадках застосовуються компактні пасивні спліттери, які не потребують джерел живлення. Завдяки відсутності електрооптичних перетворень по всій довжині тракту, PON є «прозорою» до змін технологічних параметрів: її топологія дозволяє без складної модернізації переходити на вищі швидкості передачі даних або впроваджувати нові довжини хвиль. Серед альтернативних варіантів поділу каналу в напрямку до центрального вузла (upstream) розглядається використання мультиплексування за довжиною хвилі (WDM), коли кожен абонент передає дані на індивідуальній довжині хвилі. Попри концептуальну простоту, цей підхід майже не застосовується на практиці через високу вартість. Така схема потребувала б або гнучких приймачів, здатних змінювати налаштування, або набору приймачів на стороні OLT для обробки кожного каналу. Крім того, кожен ONU повинен працювати в чітко визначеному діапазоні, що ускладнює адміністрування мережі, підвищує вартість обладнання й унеможливлює самостійну заміну користувачем пошкодженого термінала без ризику порушення цілісності мережі через конфлікт довжин хвиль. Теоретичне рішення у вигляді переналаштовуваних лазерів не знаходить широкого впровадження через свою високу собівартість на сучасному етапі розвитку технологій, що робить WDM-PON малопридатним для масового застосування. У мережах доступу переважна частина трафіку має напрямок від провайдера до клієнта (downstream), а не між кінцевими користувачами. Тому доцільним є поділ пропускних каналів за напрямками. Одним зі способів є просторове розділення (SDM – Space Division Multiplexing), коли кожному напрямку відповідає окреме волокно. Утім, з метою скорочення витрат, часто використовується одне волокно для двобічного обміну. У цьому разі для розмежування потоків застосовуються різні довжини хвиль – зазвичай 1310 нм для зворотнього трафіку (upstream) і 1550 нм для прямого потоку (downstream), як показано на рисунку 1.9. Такий підхід дозволяє незалежно варіювати смугу пропускання для кожного з напрямків відповідно до актуальних потреб користувачів і провайдера.

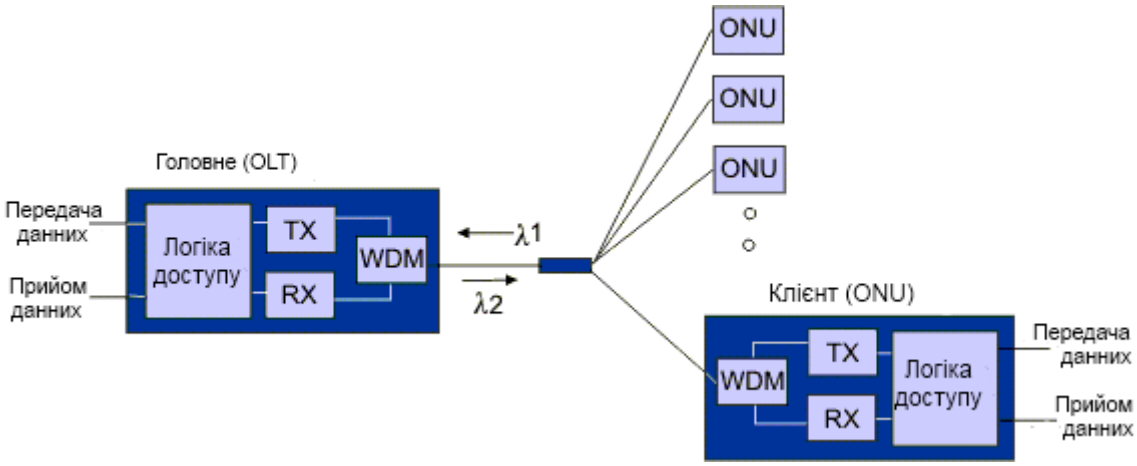


Рис. 1.9. PON з одним волокном [3]

Часовий поділ доступу (TDMA) є оптимальним підходом для організації передачі в оптичних мережах, оскільки дозволяє обмежитися використанням єдиної довжини хвилі, наприклад 1310 нм, та одного оптичного трансивера в складі термінала OLT. Це рішення суттєво знижує загальні витрати на реалізацію системи. У мережі PON через неоднакову віддаленість абонентських терміналів ONU від центрального офісу CO наявна нерівномірність рівня оптичного сигналу, який надходить до OLT. Унаслідок цього потужність сигналу, прийнятого в різних часових слотах, може значно відрізнятися для кожного ONU. Одним зі способів компенсації цієї нерівномірності є впровадження механізму динамічного регулювання потужності випромінювання на рівні передавача ONU. Такий підхід дозволяє вирівняти сигнали, що надходять до OLT, до єдиного рівня. Проте реалізація цієї стратегії ускладнює конструкцію абонентських модулів, потребує додаткового протоколу обміну зворотним зв’язком для координації дій кожного ONU і, що важливо, потенційно знижує ефективність всієї мережі до рівня найменш сприятливого сценарію – тобто до характеристик найбільш віддаленого термінала. Додатковим викликом є не лише потреба в забороні передавання даних поза межами виділеного часового слоту, а й необхідність повного заглушення оптичного випромінювання лазера. Адже навіть у пасивному режимі передавач може генерувати паразитні шумові сигнали. Такий шум від кількох ONU, розташованих близько до OLT, здатен суттєво завадити прийому слабкого сигналу від більш віддалених користувачів. У зв’язку з цим критично важливим є

забезпечення чіткого вимикання лазерів в міжслотові інтервали. Проте це породжує іншу проблему – після вимкнення лазер охолоджується, а при повторному включенні потребує прогріву, що впливає на стабільність початкової потужності сигналу. Відтак лазерний передавач має бути здатним до швидкого виходу на стабільний режим роботи без значного часу розгону, аби не погіршити якість передачі в мережі загалом.

1.2 Технологія APON/BPON

Наприкінці XX століття загальноприйнятою була думка, що лише використання протоколу ATM дозволить забезпечити гарантовану якість обслуговування під час передавання даних між кінцевими абонентами. Враховуючи це, FSAN обрало ATM як базову транспортну технологію для реалізації мультисервісної підтримки в оптичному середовищі. У жовтні 1998 року було затверджено перший міжнародний стандарт ITU-T G.983.1, що формалізував архітектуру APON (ATM-based PON) (див. табл. 1). Цей стандарт передбачав передавання ATM-комірок по деревоподібній топології мережі PON і заклав основу для подальшого розвитку цієї технології. Упродовж наступних кількох років специфікація зазнала значного вдосконалення – з'явилася серія доповнень та оновлень у рамках рекомендацій G.983.x (де x=1-7), які, серед іншого, передбачали збільшення швидкості передавання даних до 622 Мбіт/с. У березні 2001 року була опублікована рекомендація G.983.3, яка ввела нову назву – BPON (Broadband PON) – і суттєво розширила функціональні можливості системи. До ключових нововведень BPON можна віднести інтеграцію підтримки передачі різних типів інформаційного трафіку, зокрема голосових викликів, відеосигналу та пакетних даних, що дозволило виробникам розробляти відповідні інтерфейси як на стороні оптичного лінійного термінала (OLT) для підключення до магістральних мереж, так і на стороні абонентського термінала (ONT) для взаємодії з користувачем. Крім того, BPON передбачав розширення спектрального діапазону передачі, що відкрило можливість паралельного надання додаткових послуг – наприклад, трансляції телевізійного сигналу за окремою довжиною хвилі в межах тієї самої

оптичної інфраструктури. Це стало основою для реалізації концепції «три в одному» (triple play) – єдиного доступу до Інтернету, телефонії та телебачення.

Таблиця 1.1

Основні відомості стандарту PON G.983.1

Характеристика	Специфікація
Хвильова довжина низхідного сигналу (до абонентів)	базова довжина хвилі 1550 нм, з розширенням у DWDM 15xx нм, C-band
Хвильова довжина висхідного сигналу	базова довжина хвилі 1310 нм, з розширенням у DWDM 15xx нм, C-band
Швидкість передачі низхідного потоку	155 Мбіт/с; 622 Мбіт/с
Швидкість передачі висхідного потоку	155 Мбіт/с; 622 Мбіт/с
Величина бюджету оптичної лінії базується на максимальному розщепленні сигналу на спліттер та максимально можлива довжина лінії, дБ.	Клас А: 5-20 Клас В: 10-25 Клас С: 15-30
Максимально допустимі втрати сигналу в оптичних лініях, дБ	15
Категорії волокон та технічні вимоги для ліній передачі	Стандартне одномодове волокно ITU G.652 з нульовою дисперсією поблизу довжини хвилі 1310 нм.
Максимальна кількість ONT, підключених до одного волокна від OLT	32
Гранична відстань передачі між центральним вузлом та абонентським терміналом	20 км
Типи з’єднувачів оптичної мережі PON	SC-PC / FC-PC з показником зворотного відображення ≤ –35 дБ
Технічні вимоги до оптичних елементів (з’єднувачі, розгалужувачі, де / мультиплексори WDM)	Згідно з рекомендацією G.671

Сучасна архітектура APON (ATM Passive Optical Network) реалізує механізм динамічного розподілу смуги пропускання (DBA – Dynamic Bandwidth Allocation), що дозволяє гнучко управляти ресурсами між різними сервісами та абонентськими терміналами ONT. Такий підхід забезпечує ефективне обслуговування як широкосмугових (інтернет, відео), так і вузькосмугових (телефонія, телеметрія) додатків.

Інфраструктура APON підтримує широкий спектр інтерфейсів для інтеграції з магістральними мережами. Серед них – SDH (STM-1), ATM (STM-1/4), Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, а також інтерфейси для передавання відео (SDI PAL). На абонентському боці забезпечується сумісність з такими інтерфейсами, як E1 (відповідно до рекомендації ITU-T G.703), Ethernet 10/100Base-TX та аналогова телефонія (FXS).

Оскільки в топології дерева PON прямий потік транслюється одночасно до всіх підключених ONT, існує потенційна загроза несанкціонованого доступу до переданих даних. Щоб запобігти можливому перехопленню інформації сторонніми ONT, у специфікації APON передбачено використання криптографічного захисту прямого потоку на основі технологій шифрування з відкритими ключами. Що стосується зворотного каналу, потреби шифрування немає, оскільки дані передаються виключно від ONT до OLT, розташованих у межах інфраструктури провайдера, де рівень фізичного захисту є контрольованим.

1.3 Технологія GPON

Архітектуру мережі доступу GPON (Gigabit PON) слід розглядати як логічне продовження розвитку технології APON, що дає можливість збільшити пропускну здатність PON і ефективніше передавати дані мультисервісних додатків. Відповідний стандарт ITU-T Rec. G.984.3 було затверджено в жовтні 2003 року. GPON пропонує масштабовану структуру кадрів зі швидкостями передачі в діапазоні від 622 Мбіт/с до 2,5 Гбіт/с, підтримуючи як системи з однаковими швидкостями прямого та зворотного потоку в PON-дереві, так і з асиметричною пропускною здатністю. Основою GPON є стандарт ITU-T G.704.1 GFP (generic

framing protocol), що забезпечує інкапсуляцію будь-яких сервісів, зокрема TDM, у синхронний транспортний протокол.

За даними досліджень, навіть за умови несприятливого розподілу трафіку та коливань потоків, ефективність використання смуги GPON досягає 93 %, що значно перевищує 71 % у APON і суттєво краща за EPON. Якщо в технології SDH розподіл смуги здійснюється статично, то GFP, зберігаючи структуру SDH-кадру, дозволяє здійснювати динамічний розподіл пропускної здатності.

1.4 Ethernet PON (EPON)

Можливості швидкодії Ethernet досягли рівня 10 Гбіт/с, проте питання доєднання окремих користувачів до сервіс-провайдера, відоме як проблема «останньої милі», залишається актуальним. Обсяги інформаційного трафіку щорічно зростають майже вдесятеро. Технологія пасивних оптичних мереж (PON), стандартизована в IEEE 802.3ah, покликана вирішити цю проблему. Оптичне волокно здатне забезпечити широкосмугову передачу голосу, даних і відео на відстані до 20 км і більше. Втім, оскільки розглянуті мережі належать до рівня L1, докладні описи їх функціювання не представлені в загальнодоступних документах RFC.

Пасивні оптичні мережі призначені для організації зв’язку за схемою точка-мультиточка без активних компонентів між відправником та отримувачем, з використанням виключно оптичних розгалужувачів і змішувачів. Мережі Giga-Ethernet PON, або GEPON, розробляються на базі стандарту IEEE 802.3ah [4] із такими основними параметрами:

- Швидкість передачі: 1 Гбіт/с
- Лінійне кодування: 8B/10B

WDM-мультиплексування з частотним планом:

- • Довжина хвилі downstream – 1490 нм (1550 нм для кабельного телебачення)
- • Довжина хвилі upstream – 1310 нм
- Рівень помилок (BER) – 10–12

- Можливе застосування корекції помилок FEC для збільшення кількості вузлів на одному фідерному волокні.

Інтерфейси для PON включають:

- Клас 1 – 1000BASE-PX10-D з боку OLT та 1000BASE-PX10-U зі сторони ONT
- Клас 2 – 1000BASE-PX20-D з боку OLT і 1000BASE-PX20-U зі сторони ONT
- EPON класу 1 – рівень сигналу прямого/зворотного потоку 21/23 дБ
- EPON класу 2 – рівень сигналу прямого/зворотного потоку 26/26 дБ

Максимальна довжина оптичного каналу між OLT і ONT становить:

- Для EPON класу 1 – 10 км
- Для EPON класу 2 – 20 км

Із моменту впровадження стандарту Fast Ethernet (100BASE-FX/TX), що передбачає синхронний прийом сигналу на фізичному рівні (на відміну від 10 Мбіт/с Ethernet), міжкадровий інтервал (12 байтів) і довга преамбула кадру (8 байтів) вважаються застарілими.

Застосування пасивних оптичних мереж поставало як перспективна технологія для мереж доступу від початку функціювання Інтернету. Рекомендації ITU G.983, розроблені в рамках ініціативи FSAN (Full Service Access Network), визначали оптичний доступ типу PON для мереж, у яких на рівні L2 використовувався ATM. Ініціатива FSAN, що стартувала в 1995 році, покладала значні сподівання на ATM як основу для локальних мереж, MAN та опорних мереж. Проте згодом технологія Ethernet значно перевершила ATM, ставши універсальним мережевим стандартом. Сьогодні в світі експлуатується понад 320 мільйонів Ethernet-інтерфейсів [3]. Швидкість гігабітного Ethernet постійно зростає, а обладнання з підтримкою 10-гігабітного Ethernet стало загальнодоступним. Очевидно, що Ethernet стала панівною технологією для мереж MAN і WAN, а оскільки близько 95% локальних мереж (LAN) побудовані на Ethernet, ATM PON не може ефективно конкурувати як засіб інтеграції двох Ethernet-мереж.

Водночас Ethernet є логічним вибором для мереж, орієнтованих на IP-доступ. Завдяки впровадженню нових механізмів забезпечення якості обслуговування (QoS), Ethernet здатна підтримувати передачу даних, голосу та відео. До таких технологій належать повнодуплексний режим передачі (P802.1p) та віртуальні локальні мережі (VLAN; P802.1Q). Ethernet є недорогою, поширеною технологією з широким спектром сумісного обладнання, що забезпечує її повсюдне застосування.

Стандарт IEEE 802.3 визначає дві базові конфігурації для мережі Ethernet. В одній конфігурації використовують алгоритм доступу CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). В іншій конфігурації станції доєднуються до мережі за допомогою перемикача з використанням повнодуплексного з'єднання точка-точка. Особливістю EPON є те, що тут використовується комбінація загального мережного середовища та мережі, побудованої за схемою точка-точка.

EPON – це оптична мережа, що працює за схемою точка-мультиточка (PtMP) без використання активних компонентів на ділянці передачі між передавальним та приймальним пристроями. У системі EPON застосовуються виключно пасивні елементи, зокрема оптичні кабелі, роз'єми та розгалужувальні пристрої. Така архітектура дає змогу знизити витрати шляхом зменшення кількості оптичних трансиверів, центральних терміналів управління й загальної довжини волокон.

Усі обміни в EPON реалізуються між OLT і ONU. ONU виконує функції окремого клієнта (волокно-до-дому) або множинного клієнта. У напрямку downstream EPON являє собою широкомовне середовище; пакети Ethernet передаються за допомогою OLT через пасивні розгалужувачі 1:N або через каскад розгалужувачів і надходять до ONU. ONU відбирає пакети, адресовані його користувачам, і відкидає всі інші (рис. 1.10).

У напрямку «вниз за течією» (CO -> клієнт), кадри Ethernet передаються OLT в ONU через 1: N пасивних розгалужувачів. N зазвичай перебуває в діапазоні між 4 і 64. Через те, що Ethernet є широкомовним за своєю природою, у напрямку «вниз за течією» (від мережі до клієнта), він ідеально підходить для роботи в рамках PON:

пакети передаються широкомовно OLT і сприймаються в ONU місця призначення відповідно до MAC-адрес (рис. 1.10).

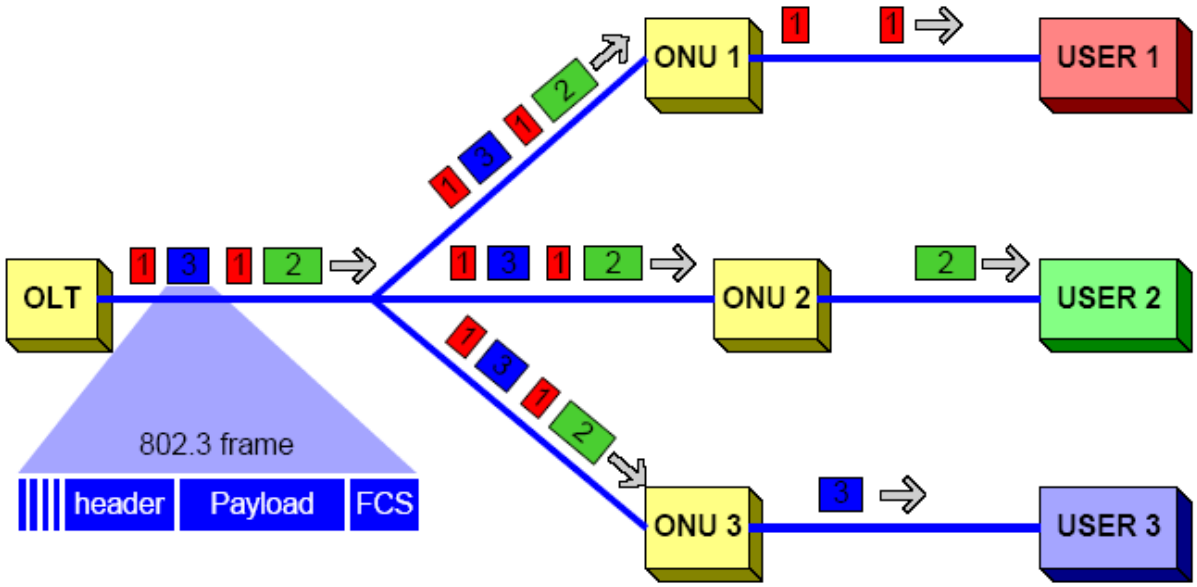


Рис. 1.10. Трафік від CO до клієнтів (вниз за течією) [3]

У напрямку upstream, завдяки спрямованості пасивного оптичного розподілювача, усі інформаційні кадри, що надсилаються будь-яким ONU, потрапляють виключно на вхід OLT, минаючи інші ONU. У цьому аспекті поведінка мережі EPON у висхідному напрямку нагадує архітектуру типу «точка-точка» [11]. Проте, на відміну від справжніх топологій «точка-точка», в EPON можливі колізії між кадрами від різних ONU у випадку одночасної передачі, що потребує спеціального арбітражного механізму для запобігання таким зіткненням.

Використання конкурентного доступу до середовища передачі, подібного до CSMA/CD, в умовах EPON наштовхується на низку труднощів. Зокрема, ONU не мають можливості виявити колізії, які можуть виникнути в OLT, через оптичні властивості направленості пасивного сплітера. Теоретично, OLT здатен детектувати такі зіткнення та передати ONU відповідний сигнал jam, однак значні затримки поширення, притаманні PON з протяжністю ліній понад 20 км, значно знижують ефективність цієї стратегії.

Крім того, механізм арбітражу, заснований на суперництві, має вроджену властивість стохастичності сервісу: доступ до каналу та його пропускна здатність

можуть бути схарактеризовані лише статистичними середніми величинами. Відсутність гарантії отримання доступу в межах короткого інтервалу часу є неприйнятною в умовах сучасних мереж доступу, що повинні забезпечувати передавання не лише даних, а й трафіку реального часу — зокрема голосових і відео потоків, для яких критичними є затримки доставки.

Схема передавання даних у напрямку від абонента до центрального офісу в межах EPON проілюстрована на рис. 1.11.

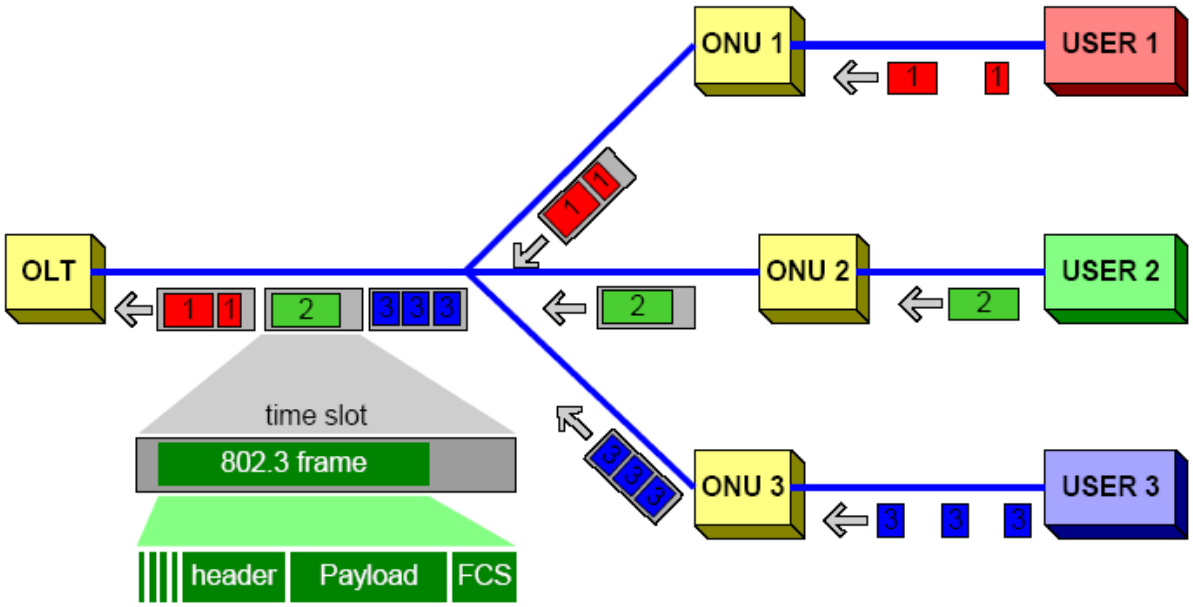


Рис. 1.11. Трафік від клієнтів до СО [3]

Усі ONU синхронізовані від єдиного джерела часу, при цьому кожному ONU виділений певний часовий домен. У межах цього домену може відбуватися передавання кількох Ethernet-кадрів. ONU зобов'язаний накопичувати кадри, отримані від клієнта, до моменту настання власного часового домену. У визначений час ONU передає всі кадри з буфера з максимальною канальною швидкістю, що відповідає одному із стандартів Ethernet (10/100/1000/10000 Мбіт/с). Якщо обсяг даних у буфері недостатній для повного заповнення домену, передаються заповнювальні 10-бітові символи.

Існують різні підходи до виділення часових доменів: від статичних схем TDMA (Time-Division Multiple Access) до динамічних, які враховують поточний

розмір черги в кожному ONU, тобто статистичного мультиплексування. Також можливі схеми, які враховують пріоритети трафіку, якість обслуговування (QoS), угоди про рівні обслуговування (SLA) тощо.

Існує також децентралізована схема динамічного виділення часових доменів, за якої ONU самостійно визначають момент початку та тривалість передачі даних. Цей підхід нагадує маркерний метод, але з використанням пасивного кільця. Перед початком передавання кожен ONU відправляє спеціальне повідомлення з інформацією про обсяг байтів, які планує передати. ONU, що має передавати наступним (зазвичай за карусельним алгоритмом), контролює передавання попереднього вузла і починає своє передавання таким чином, щоб кадр прибув на OLT безпосередньо після завершення передавання попереднього ONU. Така синхронізація усуває колізії та втрати пропускної здатності.

Проте ця схема вимагає забезпечення конективності між ONU, що накладає певні обмеження на топологію мережі – вона має бути реалізована у вигляді кільця або широкомовної зірки. Такі вимоги є небажаними, оскільки можуть збільшувати довжину волокон або не відповідати вже прокладеній інфраструктурі.

У підсумку, найкращий алгоритм повинен бути універсальним і підтримувати будь-яку топологію PON типу «точка-мультиточка». В оптичних мережах доступу враховується лише конективність між OLT та кожним ONU (downstream) і навпаки (upstream), що характерно для всіх топологій PON. Тому OLT постає єдиним вузлом, який здійснює арбітраж для доступу до каналу з часовим поділом.

Основна складність динамічного арбітражу на базі OLT полягає у відсутності в нього точних відомостей про обсяг буферизованих даних в ONU через імпульсивність інформаційного трафіку. Для присвоєння часових доменів OLT необхідно мати актуальну інформацію про стан кожного ONU. Одним із варіантів розв’язання цієї проблеми є використання схеми обміну повідомленнями Grant та Request. ONU надсилають Requests для інформування OLT про зміну свого стану, зокрема обсяг буфера, а OLT відповідно обробляє запити і призначає часові домени за допомогою повідомлень Grant.

Перевага централізованого управління полягає в тому, що OLT має повну інформацію про мережу і може динамічно переходити на інші алгоритми керування за потреби. При цьому ONU не вимагається моніторити стан мережі або узгоджувати параметри, що спрощує їх реалізацію, знижує вартість і підвищує надійність мережі загалом.

1.5 Протокол управління багатоточковим обміном (MPCP)

Для реалізації призначення часових доменів з боку OLT було запроваджено протокол MPCP, розроблений в рамках IEEE 802.3ah. Основу цього протоколу становлять два типи повідомлень Ethernet – GATE та REPORT. Повідомлення GATE, що передається від OLT до ONU, застосовується для визначення часових інтервалів передачі. У свою чергу, ONU надсилає REPORT, який містить інформацію про свій стан, зокрема про рівень заповнення буфера, що дозволяє OLT приймати обґрунтовані рішення щодо призначення доменів. Обидва типи повідомлень мають формат керівних кадрів MAC типу 88-08.

MPCP функціонує у двох основних режимах: режимі автовиявлення та в стандартному робочому режимі. У першому випадку здійснюється виявлення новопідключених ONU, фіксується їх MAC-адреса, розраховується RTT, а також можуть визначатися інші важливі параметри. Після завершення цього етапу ONU переходить до звичайного режиму, в якому відбувається регулярне призначення часових доменів для передавання даних.

Оскільки до процесу ініціалізації можуть одночасно долучитися кілька ONU, автовиявлення організовано як конкурентну процедуру. Алгоритм її реалізації включає такі кроки:

1. OLT виділяє стартовий часовий домен – інтервал, протягом якого неініціалізованим ONU дозволяється виконати передачу. Тривалість цього домену повинна відповідати виразу: <transmission size> + <maximum round-trip time> - <minimum round-trip time>, де <transmission size> – це розмір вікна передачі (transmission window), яким може скористатися ONU.

2. До неініціалізованих ONU надсилається повідомлення GATE з індикацією початку ініціалізації та заданою тривалістю інтервалу. При формуванні повідомлення MPCP додає часову мітку, що відповідає локальному часу OLT на момент передачі.

3. Відповідь на це повідомлення надходить виключно від ONU, які ще не пройшли ініціалізацію. Після прийому GATE кожне ONU синхронізує свій внутрішній таймер із часовою міткою, що міститься в повідомленні.

4. Коли локальний годинник ONU досягає позначеного моменту, генерується повідомлення REPORT (ініціалізації), яке передається до OLT. У ньому вказується MAC-адреса ONU та час, зафіксований у момент відправлення.

5. OLT, отримавши REPORT, ідентифікує ONU та розраховує його RTT, віднімаючи часову мітку з REPORT від моменту прийому цього повідомлення (див. рис. 1.12).

За умови одночасного відгуку кількох ONU на один і той самий GATE можливі колізії, в результаті яких частина REPORT не досягає OLT. У випадку, якщо ONU не отримує призначення часової області у визначений час, він припускає, що сталася колізія, і повторює ініціалізацію після випадкової кількості пропущених GATE. При повторних колізіях пауза збільшується за принципом експоненціального зростання.

Одне повідомлення GATE здатне містити до чотирьох grants, тобто інтервалів передачі, що призначаються ONU. Якщо ONU обслуговує кілька черг, воно може самостійно розподіляти виділені ресурси між ними. У відповідь ONU надсилає REPORT, у якому може бути відображено до восьми черг, кожна з яких може містити кілька порогових значень. Це дає змогу OLT точніше регулювати виділення ресурсу, запобігаючи як перевантаженню, так і недовантаженню каналу. Повідомлення REPORT обмежується розміром 64 байти. ONU має змогу передавати до 2 порогів на кожну з 8 черг або до 13 порогів, якщо використовується лише одна черга.

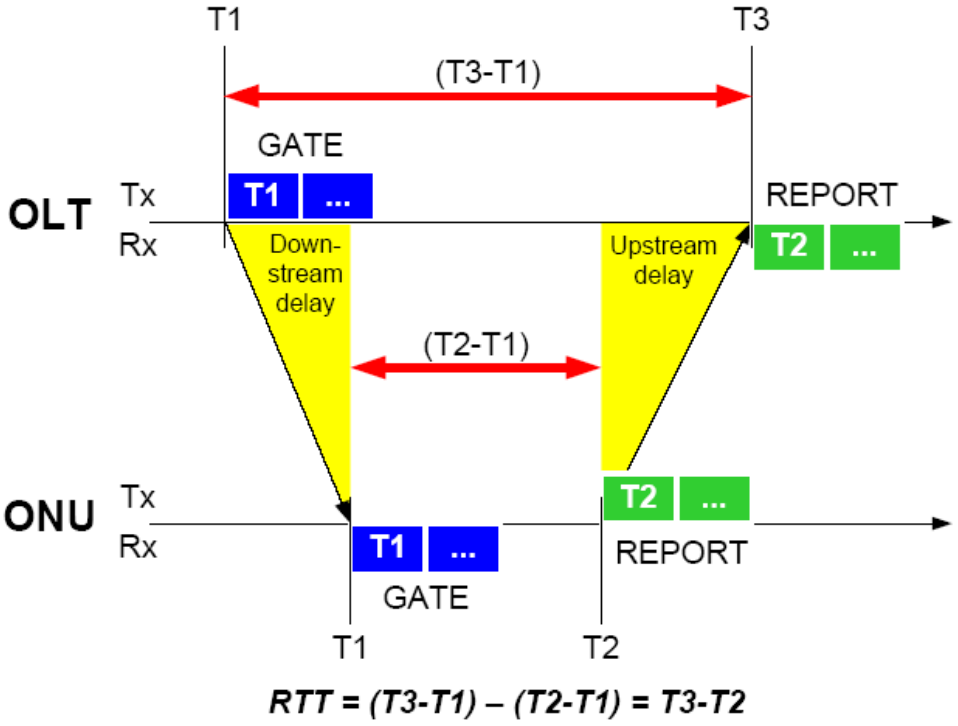


Рис. 1.12. Вимірювання RTT [3]

Наведений нижче приклад ілюструє типове функціонування протоколу MPCP у штатному режимі. Слід підкреслити, що протокол MPCP не залежить від конкретного алгоритму розподілу смуги пропускання. Його призначення полягає винятково в забезпеченні передавання відповідних керівних рішень, сформованих на рівні OLT, до абонентських терміналів ONU. Таким чином, MPCP постає як механізм перенесення команд диспетчеризації, не впливаючи безпосередньо на логіку самого розподілу ресурсу.

1. З вищого рівня управління MAC протокол MPCP отримує запит на передавання повідомлення GATE для відповідного ONU, що містить інформацію про час початку передавання та його тривалість (див. рис. 1.13).

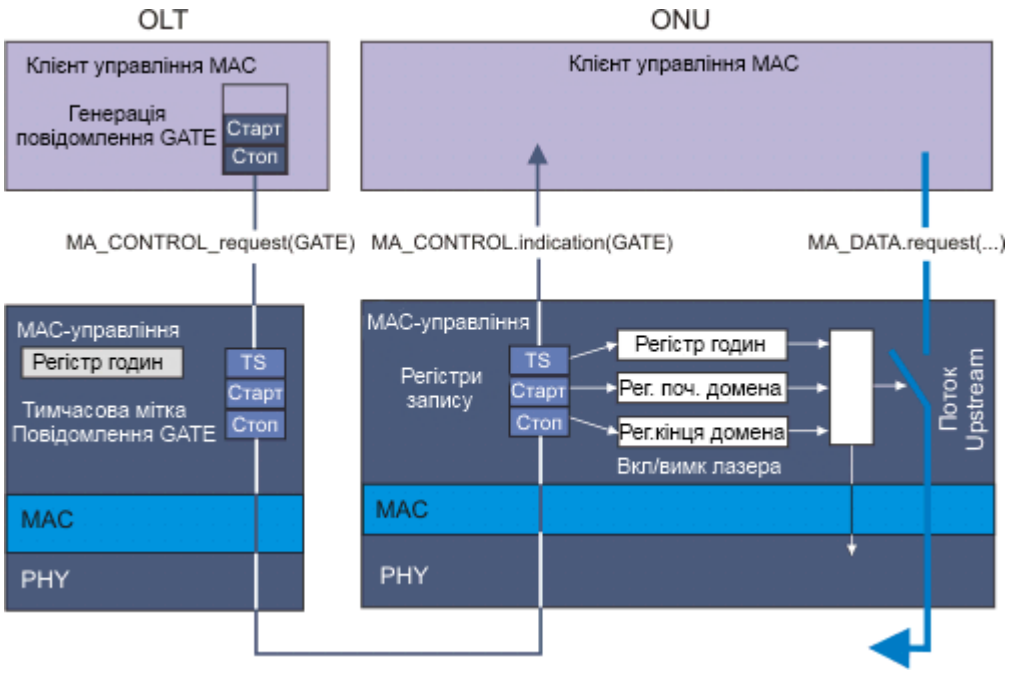


Рис. 1.13. MPCP – робота GATE [3]

2. На рівні MPCP (у пристроях типу OLT і кожному з ONU) підтримується синхронізація внутрішнього годинника. Після того, як повідомлення типу GATE передається з вищого рівня до MAC-рівня, MPCP генерує часову позначку, спираючись на поточне значення свого локального часу.

3. При отриманні GATE-повідомлення, адресованого конкретному ONU (оскільки ці повідомлення мають унікальний характер), відповідний термінал конфігурує власні регістри відповідно до часу початку передавання і його тривалості, визначених у повідомленні. Крім того, ONU здійснює перевірку відповідності моменту отримання повідомлення значенню часової позначки, що міститься в ньому. Якщо встановлено, що розбіжність перевищує допустимий контрольний інтервал, вважається, що синхронізація була втрачена. У цьому випадку ONU переходить у неініціалізований стан, у якому передавання даних заборонене. У цьому режимі пристрій лише пасивно відстежує вхідний потік даних, очікуючи чергового ініціалізаційного GATE-повідомлення для відновлення роботи.

4. Якщо момент отримання повідомлення відповідає часовій позначці всередині самого повідомлення, ONU коригує свій локальний годинник на основі

цієї інформації. Коли внутрішній таймер досягає заданої позначки початку передачі, ONU ініціює передавання даних. Передавання може охоплювати кілька повноцінних Ethernet-кадрів, причому гарантована відсутність фрагментації кадрів. Якщо наступний кадр не вміщується в залишковий інтервал наданої часової області, його передавання відкладається до наступного дозволеного вікна. Щодо звітності про стан черги ONU формує REPORT-повідомлення в межах виділеного для нього часового інтервалу, паралельно з передаванням корисного трафіку. Ці повідомлення можуть генеруватись автоматично або на вимогу OLT. Вони створюються на рівні клієнтського керування MAC і прив'язані до часової структури MAC-рівня (рис. 1.14). Як правило, REPORT включає інформацію про бажану тривалість наступного інтервалу передачі, яка визначається на основі рівня заповнення буферної пам'яті в ONU. У процесі запиту ресурсу необхідно враховувати службові накладні витрати, зокрема преамбулу кадру (64 біти) та міжкадрову паузу IFG (96 біт), що супроводжують кожну одиницю переданих даних.

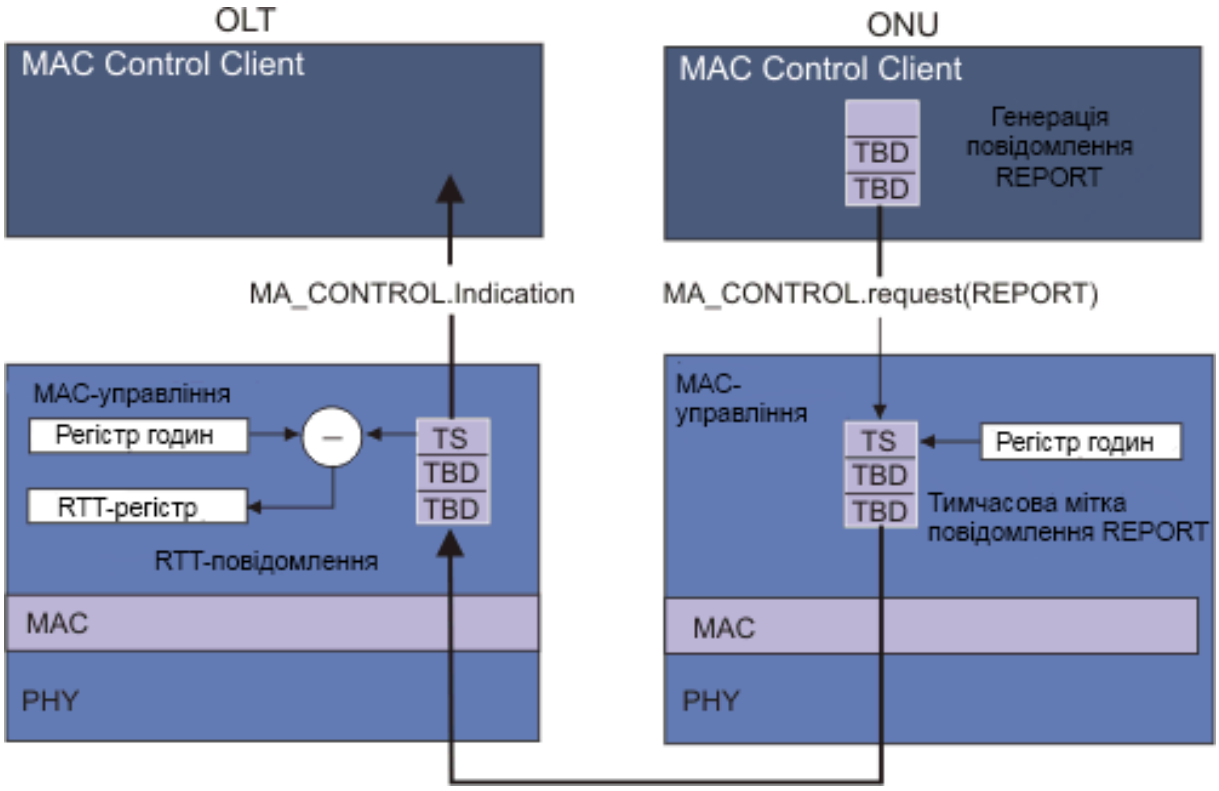


Рис. 1.14. MPCP – робота REPORT [3]

Після надходження до OLT повідомлення REPORT, яке містить часову мітку, передається на рівень MAC-урядування, що відповідає за розподіл смуги пропускання між абонентськими вузлами. Одночасно з цим виконується повторне обчислення часу затримки туди й назад (RTT) для відповідного ONU, як показано на рис. 1.12. Незначна зміна у значенні RTT відносно попереднього може бути зумовлена температурними флуктуаціями показника заломлення в оптичному волокні. Водночас суттєве відхилення є тривожним сигналом, оскільки воно може свідчити про порушення синхронізації в системі. У таких випадках робота ONU повинна бути призупинена до моменту повторної ініціалізації та відновлення коректної синхронізації з мережею.

1.6 Відповідність EPON архітектурі 802

Архітектура IEEE 802 визначає два типи середовища: спільно використовуване мережне середовище і повнодуплексний обмін. У спільно використовуваному середовищі всі станції підключені до одного домену доступу, де одночасно може передавати тільки одна станція, але всі станції можуть приймати дані в будь-який час. Повнодуплексний сегмент являє собою з’єднання двох станцій (або станції та мосту) за схемою «точка-точка», так що обидві станції можуть приймати й передавати одночасно. Наслідком наведених визначень є те, що міст ніколи не переадресує кадри на вхідний порт, тобто передбачено, що всі станції, підключені до одного і того ж порту, можуть обмінюватися даними один з одним без допомоги мосту. Це призводить до того, що користувачі, підключені до різних ONU однієї мережі PON, не можуть обмінюватися даними без використання мережного рівня (L3) або вищого. При цьому виникає проблема сумісності з архітектурою IEEE 802, зокрема з мостами P802.1D.

Щоб уникнути вищезазначених проблем і забезпечити інтеграцію з мережами Ethernet, пристрої, доєднані до середовища EPON, повинні мати додатковий субрівень, який емулює спільно використовуване середовище або схему «точка-точка», що відомий як SME (Shared-Medium Emulation) або субрівень PtPE (Point-to-Point Emulation). Він повинен розміщуватися нижче рівня MAC задля

збереження можливості реалізації наявних Ethernet MAC-операцій, визначених у стандарті IEEE P802.3. Робота емуляційного рівня основана на мітках кадрів Ethernet, які унікальні для кожного ONU (рис. 1.15). Їх називають «ID каналу» і розташовують у преамбулі перед початком кожного кадру.

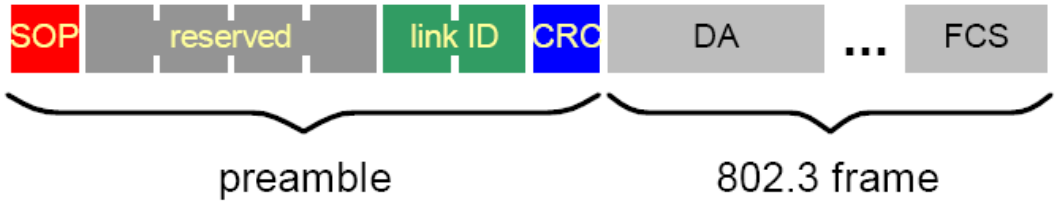


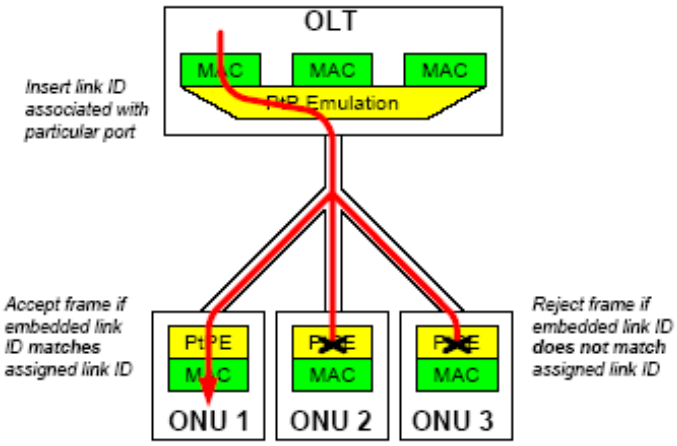
Рис. 1.15. Преамбула кадру [3]

На фазі початкової реєстрації із метою гарантування унікальності ідентифікаторів каналів кожному ONU з допомогою OLT присвоюють один або більше маркерів.

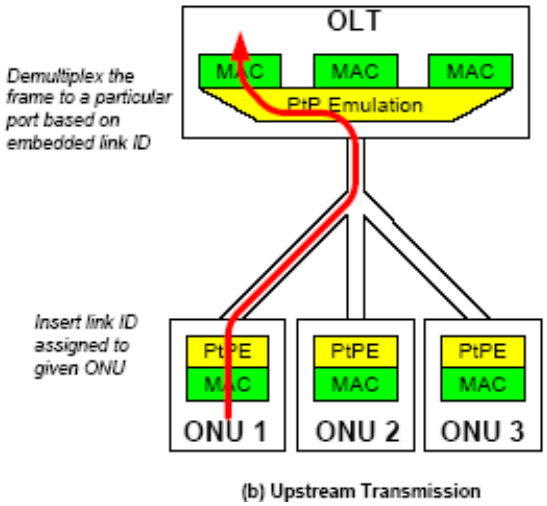
1.7 Емуляція схеми точка-точка (PtPE)

У режимі емуляції PtP OLT повинен мати N MAC-портів (інтерфейсів), по одному на кожен ONU (рис. 1.16). При посиланні кадру «вниз за течією» (від OLT до ONU), субрівень PtPE в OLT вставить ID-каналу, зв'язаний з певним MAC-портом, через який кадр доставлений (рис. 1.16, a). Навіть у цьому разі кадр буде доставлений кожному ONU, тільки один субрівень PtPE буде відповідати ID-каналу (записаному в кадрі) значенню, асоційованому з ONU, який прийме цей кадр і передасть його на свій MAC-рівень для подальшої верифікації. MAC-рівні всіх інших ONU ніколи не побачать цей кадр. Усе матиме вигляд, ніби кадр був посланий за схемою P2P тільки одному ONU.

У напрямку upstream ONU буде включати свій ID каналу в преамбулу кожного переданого кадру. Субрівень PtPE в OLT буде демультиплексувати кадри у відповідні MAC-порти на основі унікальних значень ID-каналу (рис. 1.16, b).



(a) Передавання даних downstream



(b) Передавання даних upstream

Рис. 1.16. Емуляція режиму P2P [3]

Очевидно, що конфігурація PtPE сумісна з логікою роботи моста, оскільки кожен ONU під’єднаний до незалежного порту мосту. Міст, вбудований в OLT (рис. 1.17), буде передавати трафік між ONU через свої порти.

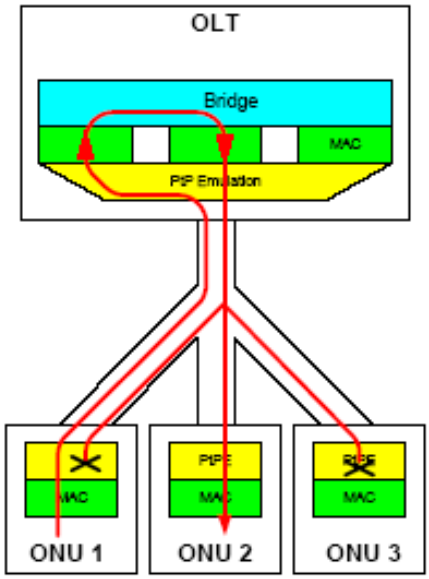
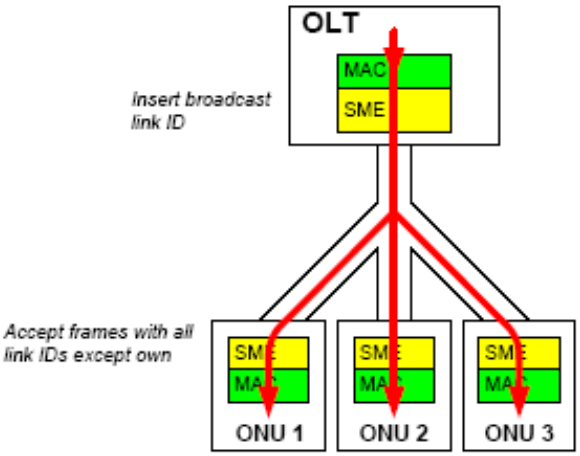


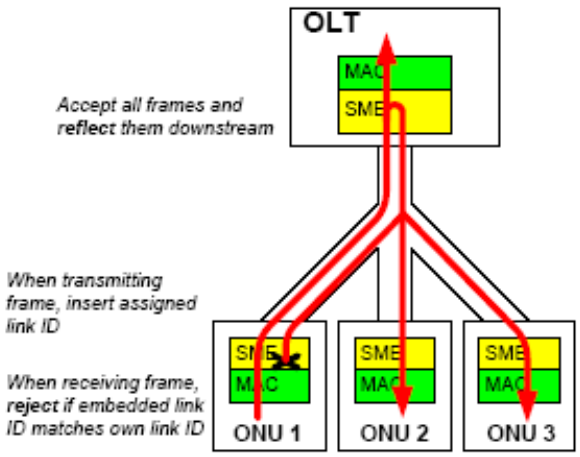
Рис. 1.17. Передавання даних через міст при емуляції p2p [3]

1.8 Емуляція спільно використовуваного середовища (SME)

Під час відтворення програмними або апаратними засобами спільно використовуваного середовища, кадри, передані будь-яким вузлом (OLT або будь-яким ONU), відповідно можуть бути отримані будь-яким вузлом (OLT чи будь-яким ONU). У напрямку downstream OLT вставить «широкомовний» ID-каналу, який буде сприйнятий кожним ONU (рис. 1.18, a). Щоб гарантувати роботу в режимі спільного використання середовища (SME) для даних, переданих «угору за течією» (кадри, послані ONU), субрівень SME в OLT повинен переадресувати всі кадри downstream, щоб вони були отримані всіма іншими ONU (рис. 1.18, b). Щоб уникнути дуплікації кадрів, коли ONU отримує свій власний кадр, субрівень SME в ONU сприймає кадри, якщо їх ID-каналу відрізняється від ID-каналу, присвоєному цього ONU.



(a) Передача даних downstream



(b) Передача даних upstream

Рис. 1.18. Емуляція сумісного використання середовища (SME) [3]

1.9 Комбінування режимів PtPE і SME

Проблему передавання даних для стандартів P802.1 можуть вирішити як PtPE, так і SME, однак жоден із названих режимів не досконалий. Зокрема, режим PtPE унеможливлює створення тільки однієї копії кадру при мультикастингу / бродкастингу, коли OLT посилає кадр, що досягає декількох ONU. Ця особливість дуже важлива для сервісів типу відео-бродкаст або бродкаст

реального часу. Щоб підтримувати ці сервіси, OLT, що працює в режимі PtPE, повинна дублювати широкомовні пакети, щоразу з різними ID-каналу.

Емуляція спільно використовуваного середовища, з іншого боку, забезпечує можливості мультикастингу / бродкастингу. Однак через те, що кожен кадр upstream переадресується downstream, витрачається помітна частина смуги downstream.

Задля оптимізації роботи можна використовувати PON з P2P і SME-емуляцією одночасно. У такій конфігурації в EPON з N ONU, OLT буде містити N +1 MAC: по одному на кожен ONU (PtPE) і один для Бродкастінгу (рис. 1.19). Кожен ONU повинен мати два MAC: один для спільно використовуваного середовища (SM) і один для емуляції каналу P2P. Для оптимального поділу трафіку більш високі рівні (вище MAC), будуть вирішувати, через який порт посилати дані (наприклад, використовуючи VLAN). Лише дані, що підлягають широкомовній розсилці, будуть надіслані на вхід порту, який з'єднаний із сегментом емуляції спільно використовуваного середовища.

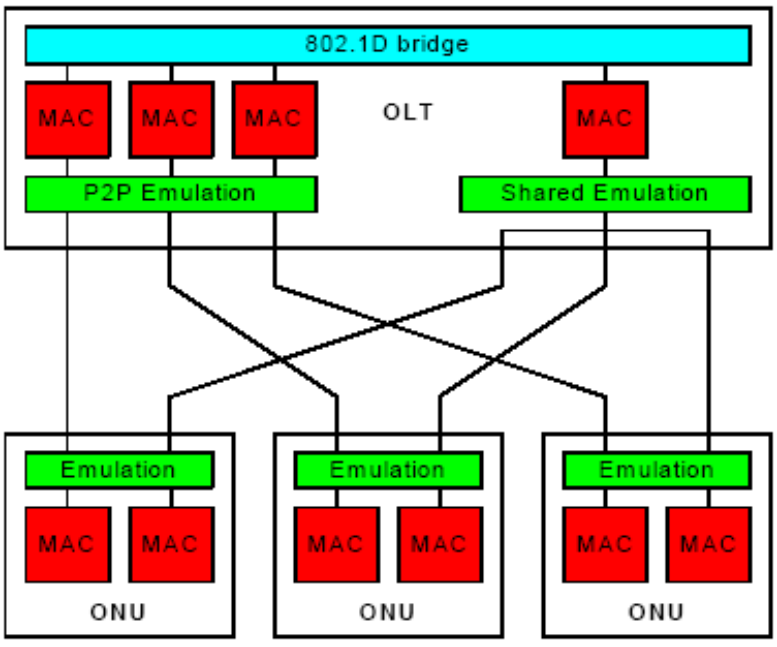


Рис. 1.19. Режим спільної емуляції SME і P2P [3]

Поле ID-каналу, розміщене в преамбулі кожного кадру, використовується для ідентифікації тунелю між OLT і ONU (емуляція PtP). Цей заголовок може також

використовуватися для зберігання індексу ключа криптографічного захисту в EPON. Для цієї мети використовується один із зарезервованих байтів заголовка (рис. 1.20). Послуговуючись кодом, що міститься в цьому полі, можна визначити, чи зашифровано вміст кадру і який застосований ключ.

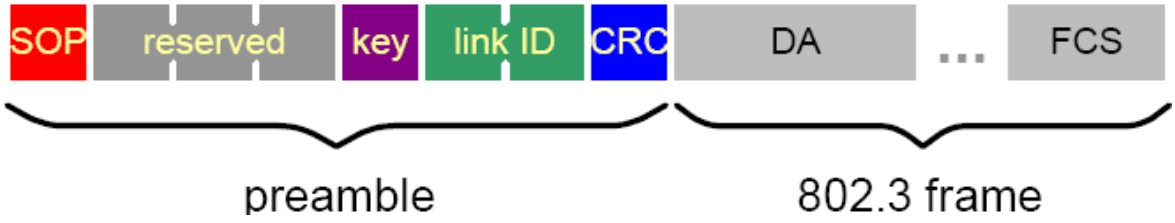


Рис. 1.20. Преамбула кадру з вбудованим ID каналу та індексом ключа шифрування [4]

Кожен ONU має ключ, який використовується для поточної сесії; його ідентифікатор є індексом ключа для ONU. Така схема спрощує перехід від однієї сесії до іншої, коли потрібно замінити ключ. Для нешифрованих кадрів використовується значення ідентифікатора ключа по-замовчуванню. Цей механізм має вбудоване розширення: різні значення індексу ключа дозволяють вибрати різні криптографічні алгоритми.

1.10 Приклади схем доставки даних і послуг в мережах PON

Основні характеристики мереж PON репрезентовані в таблицях 1.2 «Стандартизація B-PON в G.983», 1.3 «Характерні часові параметри EPON» [14, с. 227-238], 1.4 «GSR-специфікація», 1.5 «Параметри за замовчуванням» [8].

Рисунки 1.21 «Мережа надання послуг із залученням технології PON» та 1.22 «Схема доставки відеоданих» [11] містять ілюстративний матеріал про схеми доставки даних і послуг у мережах PON.

Таблиця 1.2

Стандартизація B-PON в G.983

Код протоколу	Призначення
G.938.1	Специфікація фізичного інтерфейсу OLT-ONT (upstream 155 Мбіт/с, downstream 155, 622 Мбіт/с) Додавання 622 Мбіт/с upstream; Додавання 1.2 Гбіт/с downstream
G.983.2	Специфікація інтерфейсу управління OLT-ONT (OMCI)
G.983.3	Специфікація довжин хвиль для різних сигналів в B-PON мультиплексуванні по довжинах хвиль. Додавання 622 Мбіт/с для upstream
G.983.4	Специфікація динамічного виділення смуги (DBA) для сигналів upstream
G.983.5	Специфікація живучості каналу (SUR) між OLT і ONT
G.983.6	Розширення OMCI для додавання SUR-функції для сигналу upstream
G.983.7	Розширення OMCI для додавання DBA-функції для сигналу upstream
G.983.8	Розширення OMCI для додавання сервісів IP, VLAN, відео і т.д.

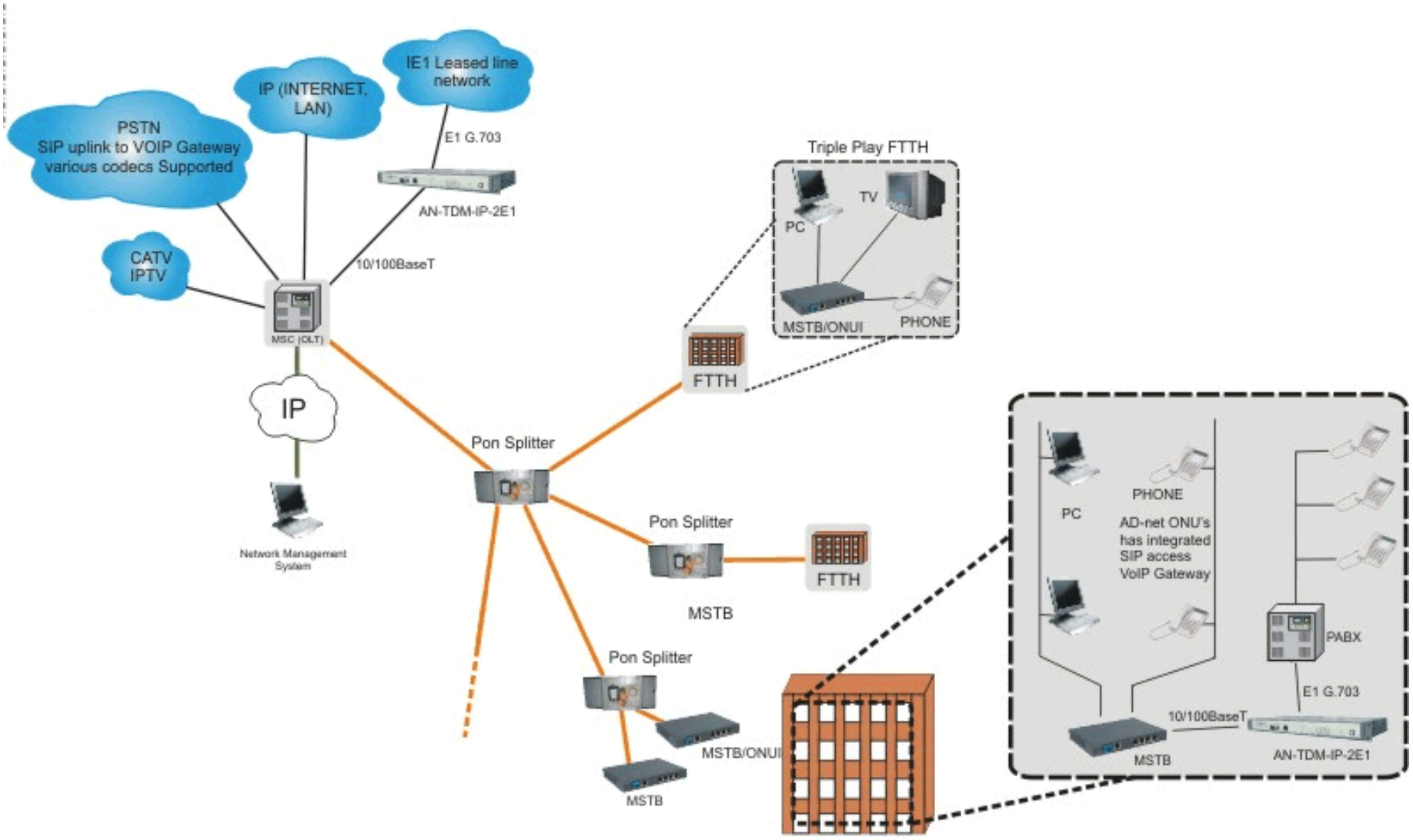


Рис. 1.21. Мережа надання послуг із залученням технології PON

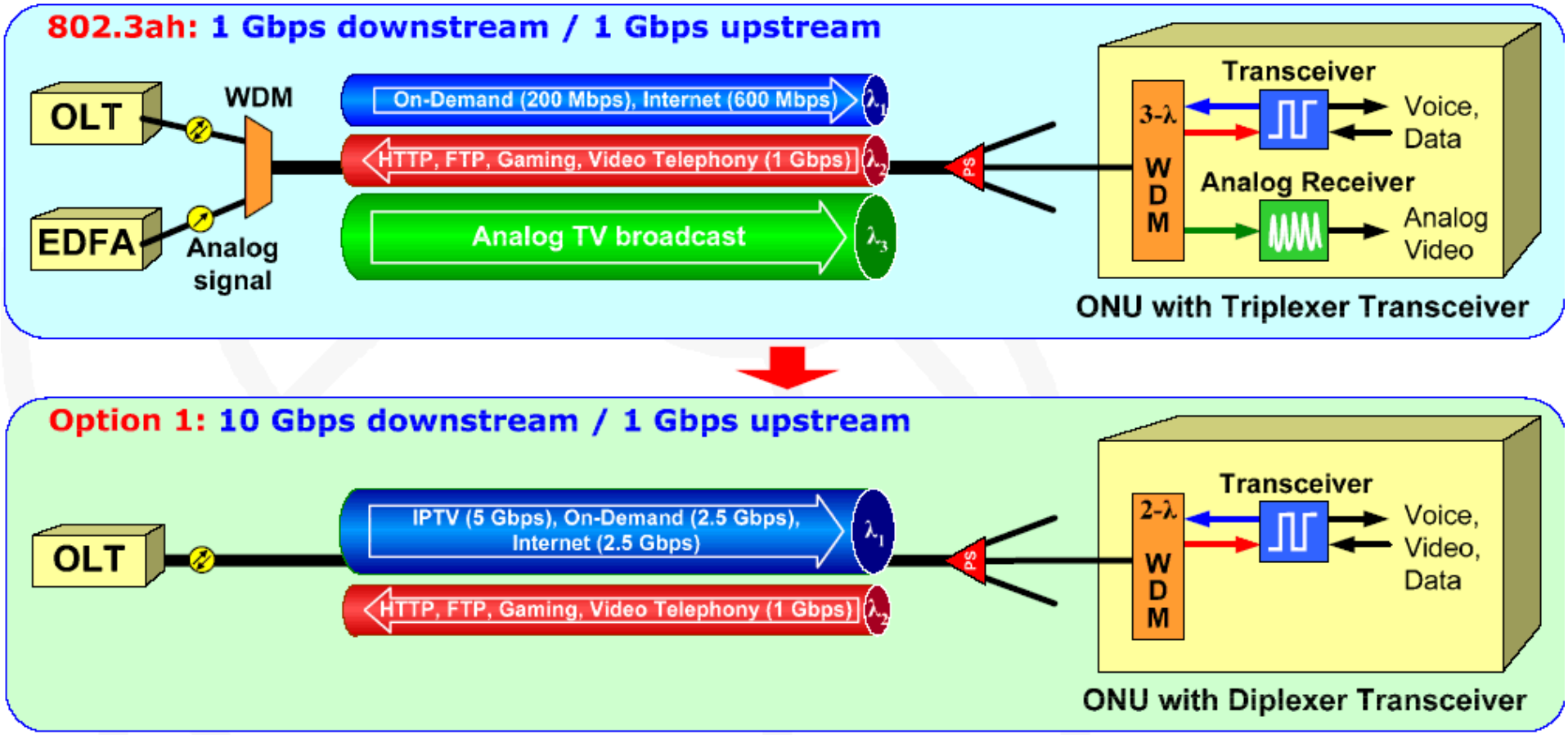


Рис. 1.22 Схема доставки відеоданих [11]

Таблиця 1.3

Характерні часові параметри EPON

Максимальний час передавання кадру Ethernet (з преамбулою), 1526 байтів	12 мкс
Періодичність опитування вузлів у нормальному режимі, не рідше ніж	1–3 мс
Час передавання керівного кадру GATE (з преамбулою), 72 байта	0,6 мкс
Час опитування стану 32 вузлів ONT мережі, 32 х 0,6	20 мкс
Споживання смуги службовими ресурсами в нормальному режимі <2% RTTmax, 20 км	< 2%
RTTmax, 20 км	200 мкс
Періодичність режиму ініціалізації (параметр конфігурації)	> 1с
Витрати реєстрації нового ONT, 2 повідомлення GATE	1,2 мкс
Інтервал ініціалізації (мовчання), максимальний	>200,6 мкс
Споживання смуги режимом ініціалізації	0,02%

Таблиця 1.4

GSR- специфікація

Швидкість передачі	Downstream: 1.2, 2.4 Гбіт/с Upstream: 155 Мбіт/с, 622 Мбіт/с, 1.2 Гбіт/с, 2.4 Гбіт /с
Фізична відстань	10-20 км
Логічна відстань	60 км
Число гілок	максимум 64 на фізичному рівні максимум 128 на ТС-рівні
Довжини хвиль	Downstream: 1480-1500 нм. Upstream: 1260-1360 нм

Таблиця 1.5

Параметри за замовчуванням [6]

Параметр	Опис	Значення
N	Число ONU	16
n	Число рівнів пріоритетів (дорівнює числу черг у ONU)	3
R_U	Швидкодія каналу користувач-ONU	100 Мбіт/с
R_N	Швидкодія каналу EPON	1000 Мбіт/с
Q	Обсяг буфера в ONU	8 Мбіт
L	Максимальна відстань між OLT і ONU	20 км
W_{MAX}	Максимальна місткість тимчасового домену	15000 байт
B	Зазор між суміжними доменами	1 мкс
T_{MAX}	Максимальна тривалість циклу $T_{MAX} = T(B + (W_{MAX}/R_U))$	2 мс

У липні 2007 року ухвалено документ RFC-4837, який визначає специфічні структури і атрибути MIB, що відповідають мережам EPON, які орієнтовані на стек протоколів TCP / IP.

1.13 Переваги і недоліки архітектури PON

Серед переваг PON-мережі називають економне використання волокна через розділення обміну інформаційних потоків за принципом хвильового розділення; паралельна (деревоподібна) структура передбачає, що кожен термінал користувача – незалежний, має свій фізичний та логічний маршрут до концентратора, послідовні ланцюги виключені; високий коефіцієнт концентрації (розподілення інформаційної мережі); ієрархічне розподілення інформаційної мережі виконується на цілком пасивних елементах – оптичних розгалужувачах; широка смуга доступу – до 400 Мб/с на термінал; можливість резервування активного обладнання і пасивних шляхів; невисока вартість абонентських терміналів [10].

Таким чином, однією з ключових переваг архітектури пасивних оптичних мереж (PON) є відмова від використання проміжного активного обладнання між головним вузлом і кінцевими абонентами. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити витрати на інфраструктуру, зокрема завдяки скороченню кількості оптичних приймачів у центральному сегменті мережі та зниженню потреби прокладати велику кількість волокон. Крім економічної ефективності, досліджувана архітектура вирізняється високою масштабованістю: процедура під'єднання нових користувачів є відносно простою з технічної точки зору. Крім того, технічне обслуговування мережі не потребує складних дій у разі виходу з ладу або відключення окремих абонентських пристроїв, оскільки ці події не впливають на функціонування інших вузлів. Топологія типу P2MP, реалізована у вигляді розгалуженої структури, забезпечує гнучке планування мережі, дозволяючи адаптувати розміщення пасивних оптичних розгалужувачів відповідно до фактичної щільності абонентів, ландшафтних особливостей і витрат на прокладання та експлуатацію оптичного кабелю. Водночас до недоліків архітектури PON у базовій конфігурації можна віднести обмеженість щодо резервування – дерево, як найпростіший тип топології, зазвичай не містить механізмів відновлення у разі пошкодження ліній зв'язку або виходу з ладу центрального елемента, що може негативно позначатися на загальній надійності мережі. Також специфіка передавання сигналу та його розподілу в пасивному середовищі ускладнює реалізацію деяких технологічних рішень порівняно з активними мережами.

РОЗДІЛ 2. ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ PON

2.1 Основні поняття та визначення

Із позицій теорії надійності, системи PON – це складні динамічні системи, тобто сукупність технічних пристроїв та елементів, що взаємодіють в процесі виконання виробничих задач на основі певного функціонального взаємозв'язку.

У межах теорії надійності об'єктом вважають технічний виріб, що має певне призначення та розглядається на всіх стадіях створення і використання. Такими об'єктами можуть бути системи PON, їхні складові, пристрої, вузли або окремі елементи.

Система – це об'єкт, що являє собою сукупність взаємопов'язаних елементів. Поняття «система» та «елемент» відносні: об'єкт, що в одному випадку розглядають як систему, в іншому контексті може бути окремим елементом більш складної структури.

Надійність системи PON – властивість забезпечувати при заданих умовах експлуатації працездатність мережі зі збереженням у часі параметрів у межах, регламентованих нормативно-технічною документацією. Надійність охоплює всі сторони технічної експлуатації системи PON і її елементів і визначає ефективність їх функціонування.

Надійність елемента – це властивість виконувати задані ним функції зі збереженням у часі усіх встановлених для нього параметрів, зокрема й обслуговування елемента упродовж періоду експлуатації або заданого напрацювання.

Надійність системи PON і її елементів – це комплексна властивість. Залежно від умов експлуатації і призначення їй притаманна безвідмовність, збережуваність, ремонтопридатність і довговічність.

Усі системи, розглядувані в теорії надійності, поділяються на системи, які відновлюються, у яких після виникнення відмов відбувається заміна елемента, що відмовив, і системи, що не відновлюються, у яких заміна елемента, що відмовив, не виконується.

Елементи, що утворюють системи PON, їх апаратуру й устаткування, поділяють на первинні і елементи, що складаються з первинних.

Апаратура й устаткування системи PON належать до систем, що відновлюються, а первинні елементи – до систем, що не відновлюються.

Системи PON та їх елементи можуть перебувати в справному або несправному стані. Справність – це такий стан системи PON або її елементів, при якому вони відповідають усім вимогам, встановленим НТД. Несправність – стан системи PON або її елементів, при якому вони не відповідають хоча б одному з вимог НТД. Несправність не означає неможливість виконання об’єктом заданих функцій.

Характерна ознака апаратури й устаткування системи PON – *працездатність*, тобто такий стан, за якого виконуються задані функції зі збереженням значень основних параметрів у межах, встановлених НТД. Втрата функціональності трапляється, коли хоча б один із параметрів, що визначає функціональну придатність системи або її компонентів, виходить за допустимі межі згідно з вимогами НТД. У такому разі обладнання перебуває в неробочому стані.

Для устаткування системи PON працездатність або непрацездатність може бути повною або частковою. Повністю працездатне устаткування системи PON забезпечує максимальну пропускну здатність, відповідність експлуатаційних норм на параметри первинним нормам. Частково працездатним системам PON або її елементам властиві менша ефективність, погіршення параметрів, що перебувають у допустимих межах, встановлених для визначених умов функціонування устаткування системи PON. Частково непрацездатне устаткування системи PON може продовжувати виконувати функції, проте ефективність у такому разі нижча за допустиму.

Порівняно зі «справним» обладнанням, яке повинно повністю відповідати вимогам нормативно-технічної документації (НТД), «працездатне» обладнання системи PON має відповідати лише тим параметрам, що забезпечують її коректне функціонування. При цьому допустима наявність незначних механічних пошкоджень, відхилень окремих характеристик від паспортних значень тощо.

Таким чином, працездатний компонент може технічно вважатися несправним, якщо виявлені дефекти не впливають критично на його функціонування в рамках заданого режиму роботи.

Стан елемента або загалом системи PON, за якого подальше функціонування за призначенням стає неможливим через незворотні пошкодження, критичні відхилення технічних параметрів, надмірне зростання експлуатаційних витрат або потребу в капітальному ремонті, визначається як *граничний стан*. Параметри, за якими фіксується настання граничного стану, встановлюють у відповідних НТД для кожного типу обладнання системи PON.

У процесі експлуатації обладнання можливі переходи між різними станами: зі справного – у несправний, з працездатного – у непрацездатний тощо. Основними причинами таких переходів є технічні відмови та фізичні пошкодження елементів системи.

Пошкодженням вважають порушення справності, що не призводить до втрати працездатності. Залежно від характеру впливу, пошкодження можуть бути незначними або критичними. У разі несвоєчасного усунення серйозне пошкодження може перерости у відмову, тобто в ситуацію, коли елемент втрачає здатність виконувати свої функції. *Відмова* – це подія, що полягає у втраті працездатності обладнання.

Кожну відмову ідентифікують за допомогою критерію відмови – одного або кількох параметрів, що перевищують допустимі межі та фіксуються як ознака порушення. Конкретні значення цих критеріїв також задані в технічній документації для кожного виду обладнання.

Характер відмов може бути різним і не завжди пов’язаний із фізичними пошкодженнями. Залежно від динаміки зміни технічних характеристик, виділяють раптові та поступові відмови. Раптова відмова проявляється миттєвим виходом за межі допустимих значень одного або кількох ключових параметрів і, як правило, має випадковий характер, часто зумовлений накопиченням дрібних дефектів. Поступова відмова характеризується повільною деградацією параметрів, яка дає

змогу спостерігати певну тенденцію та прогнозувати момент виходу з ладу. Такий тип відмов є керованим з точки зору технічного обслуговування, адже його можна вчасно виявити та попередити шляхом моніторингу змін параметрів обладнання.

Залежно від взаємозв'язку розрізняють такі різновиди відмови:

– незалежні, тобто відмови елемента устаткування системи PON, не обумовлені пошкодженнями і відмовами інших елементів;

– залежні, тобто відмови елементів устаткування системи PON, обумовлені пошкодженнями або відмовами інших елементів.

За можливістю використання об'єкта при виникненні відмови розрізняють такі типи відмов:

Повна відмова – це стан, коли після виникнення відмови об'єкт може продовжувати виконувати свої функції, але один або декілька основних параметрів виходять за межі допустимих норм. Таким чином, працездатність об'єкта знижена. Для простих систем або первинних елементів повна відмова зазвичай означає повну втрату працездатності.

Часткова відмова – це стан, при якому устаткування залишається придатним до використання за призначенням, але його ефективність знижена.

За наявністю зовнішніх проявів розрізняють очевидну відмову, яка помітна одразу після виникнення без застосування спеціальних приладів, та неявну відмову, яка не має видимих ознак і може бути виявлена лише за допомогою вимірювань і випробувань.

Залежно від причини виникнення розрізняють відмови:

Конструкційна відмова пов'язана з помилками на етапі проєктування – це можуть бути недоліки конструктора, недосконалі методи розробки, а також порушення встановлених норм і правил проєктування.

Виробнича відмова зумовлена проблемами на стадії виготовлення апаратури чи комплектувальних PON, що виникають через порушення або недосконаліть технологічного процесу.

Експлуатаційна відмова виникає через недотримання правил експлуатації або ж під впливом непередбачених зовнішніх факторів.

Безвідмовність у контексті систем PON – це здатність системи та її елементів безперервно зберігати працездатність протягом визначеного часу або напрацювання.

Збережуваність апаратури й устаткування означає їхню здатність зберігати справний стан під час і після зберігання чи транспортування.

Довговічність характеризує можливість апаратури й устаткування системи PON підтримувати працездатність до досягнення граничного стану з урахуванням необхідних перерв для ремонту та технічного обслуговування, що встановлені нормативною технічною документацією.

Однією з важливих характеристик системи PON є *показник надійності* – сукупність технічних характеристик, що кількісно визначають властивості об’єкта, які становлять його надійність. Для показників надійності застосовуються дві форми представлення: імовірнісна і статистична. Імовірнісна форма більш зручна при апріорних аналітичних розрахунках показників надійності; статистична - при експериментальних дослідженнях.

Через складність формалізованого опису механізмів відмов у мережах типу PON та відсутність загальноприйнятої моделі для оцінювання втрат, зазвичай застосовуються спрощені часові підходи з дискретною ймовірнісною природою. У межах цієї роботи буде проаналізовано одну з базових моделей, згідно з якою кожен компонент системи може перебувати таких станах: працездатному або несправному. Вважається, що поточний стан кожного елемента не залежить від стану інших, хоча в реальних умовах це припущення не завжди справедливе.

Математична постановка задачі полягає в такому: маючи задану ймовірність знаходження кожного елемента у функціональному стані, необхідно обчислити інтегральну надійність усієї системи. Як узагальнення такої моделі можна розглядати підходи, у яких компоненти здатні переходити між кількома функціональними режимами, або ті, де функціональний стан задається числовим

показником, що характеризує, наприклад, обсяг переданих даних або інші метричні параметри. Подібні розширення дозволяють оцінювати не лише логічну зв'язаність, а й експлуатаційні характеристики – зокрема, пропускну спроможність.

Для двостанової моделі поняття працездатності (надійності) інтерпретується по-різному, залежно від контексту. Найчастіше виділяють такі два підходи: доступність та надійність.

Зазначимо, що кожен елемент у таких підходах потенційно перебуває у трьох станах: функціонує, вийшов з ладу або проходить фазу відновлення. Для випадку з оцінкою доступності, розрахунок здійснюється за співвідношенням між середнім часом безвідмовної роботи та загальним циклом «робота – відмова – ремонт». Надійність як функція часу визначається ймовірністю відсутності збоїв у проміжок від початку експлуатації до моменту *t*.

У подальшому аналізі в межах цієї дипломної роботи під терміном «надійність» розумітимемо саме ймовірність того, що окремий компонент або мережа в цілому зберігає працездатність, без уточнення варіантів її інтерпретації.

2.2 Показники надійності об'єктів, що не відновлюються

Основний кількісний показник надійності – ймовірність безвідмовної роботи, тобто того, що в заданому інтервалі часу від 0 до t_0 в системі PON або її елементах не виникне відмова:

$$p(t_0) = p(0,t_0) = p\{\xi_1 \geq t_0\} = 1 - F_1(t_0), \quad (2.1)$$

де ξ_1 – випадкове напрацювання обладнання системи PON або її елементів до першої відмови;

$F_1(t_0)=p\{\xi_1 \leq t_0\}$ – розподіл часу до першої відмови або функція розподілу часу безвідмовної роботи: $F_1(t)$ – ймовірність появи відмови за час t.

Функція p(t) – монотонно спадна, оскільки в процесі експлуатації об'єкта надійність може лише зменшуватися, а функція $F_1(t)$ – монотонно зростаюча (рис. 2.1).

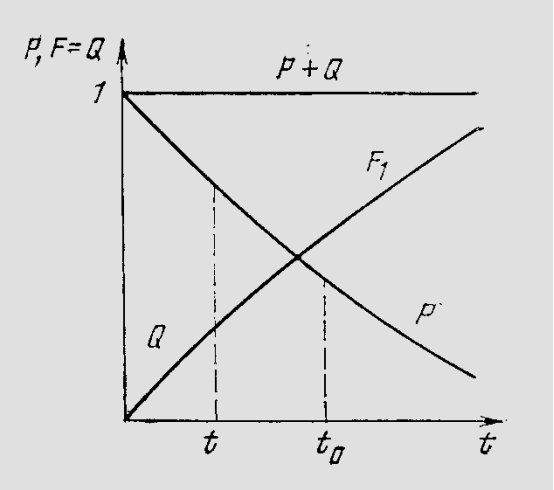


Рис. 2.1. Функції надійності p(t), ймовірності відмов Q(t) та розподілу часу безвідмовної роботи $F_1(t)$

Напрацювання визначає тривалість або об’єм роботи апаратури системи PON та її елементів. Імовірність безвідмовної роботи визначають статистично і відображають частоту настання події, за якої час безперервної роботи об’єкта до моменту відмови перевищує задане значення t_0.

$$p(t_0) = \frac{N(t_0)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t_0)}{N(0)}, \tag{2.2}$$

де $N(t_0)$ – кількість об’єктів або елементів, що безвідмовно пропрацювали до моменту часу t_0;

$N(0)$ – кількість справних об’єктів в початковий момент часу $t=0$;

$n(t_0)$ – кількість об’єктів, що відмовили до моменту t_0.

Ймовірність відмови в інтервалі від 0 до t_0 визначається як додаткова до ймовірності безвідмовної роботи, тобто

$$Q(t_0)=1-p(t_0) \tag{2.3}$$

або

$$Q(t_0) = 1 - p(t_0). \tag{2.4}$$

Показник ймовірності того, що система PON та її елементи працюватимуть без відмов протягом періоду від часу t до $t + t_0$

$$p(t,t+t_0)=\frac{p(t+t_0)}{p(t)}, \quad (2.5)$$

Тобто це величина, що відображає ймовірність безвідмовної роботи апаратури системи PON та її елементів протягом фіксованого інтервалу часу t_0, відліченого від моменту t, або умовна ймовірність того, що випадкове значення часу напрацювання до відмови перевищить $t + t_0$ за умови, що апаратура системи PON та її елементи вже пропрацювали безвідмовно до моменту t.

Статистична оцінка ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі $t + t_0$ характеризує частоту події, коли напрацювання до відмови перевищує $t + t_0$, за умови перевищення ним моменту часу t,

$$p(t,t+t_0)=\frac{N(t+t_0)}{N(t)}, \quad (2.6)$$

де $N(t+t_0)$ – кількість об’єктів, що пропрацювали до моменту часу $t+t_0$;

N(t) – кількість справних об’єктів до моменту часу t.

Ймовірність відмови апаратури системи PON та її елементів в інтервалі від t до $t+t_0$

$$Q(t, t+t_0)=1-p(t, t+t_0)=[p(t)-p(t+t_0)]/p(t) \quad (2.7)$$

або при статистичній оцінці

$$Q(t,t+t_0)=1-p(t,t+t_0). \quad (2.8)$$

Важливим показником надійності об’єктів, що не відновлюються (первинних елементів апаратури системи PON), є щільність розподілу відмов (тобто щільність ймовірності того, що час роботи об’єкта до відмови виявиться менше t), імовірнісна оцінка якої має вигляд

$$f(t)=dF(t)/dt=dQ(t)/dt=-dp(t)/dt, \quad (2.9)$$

а статистична

$$f(t)=\frac{n(\Delta t)}{N(0)\Delta t}, \quad (2.10)$$

де $n(\Delta t)$ – кількість об’єктів, що відмовили в період часу тривалістю Δt;

N(0) – кількість працездатних об’єктів в початковий момент часу t=0.

Між щільністю розподілу відмов, ймовірністю безвідмовної роботи та ймовірністю відмов існує такий зв’язок:

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau \quad , \tag{2.11}$$

$$Q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad . \tag{2.12}$$

Для оцінки надійності невідновлюваних елементів послуговуються показником інтенсивності відмов λ(t). Для визначення λ(t) використовується така імовірнісна оцінка:

$$\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{dF(t)}{dt} = \frac{f(t)}{p(t)} \quad . \tag{2.13}$$

Інтенсивність відмов характеризує умовну щільність розподілу тривалості безвідмовної роботи на момент часу *t* за умови, що до цього моменту відмова апаратури, обладнання або елемента системи PON не відбулася. Статистично величину інтенсивності відмов λ(*t*) можна оцінити за такою формулою:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t) \Delta t} \quad , \tag{2.14}$$

де n(Δt) – кількість відмов в період часу тривалістю Δt;

N(t) – кількість справних об’єктів в момент часу t.

Для високонадійних елементів p(t)≥0,99, можна припустити f(t)≈λ(t). Помилки, що при цьому виникають, не перевищують 1%, що збігається зі статистичними оцінками f(t) та λ(t).

Розходження між функціями f(t) та λ(t) полягає в тому, що f(t)dt характеризує імовірність відмови за інтервал часу Δt об’єкта, вибраного довільно з групи таких же об’єктів, причому невідомо, у якому стані (працездатному або непрацездатному) він перебуває, а λ(t)dt характеризує імовірність відмови за

інтервал Δt об’єкта, вибраного з групи об’єктів, які зберегли працездатність до моменту t.

Інтегруючи вираз λ(t), одержуємо

$$-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau = \ln p(t), p(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau] \qquad (2.15)$$

Ця формула встановлює зв’язок між імовірністю безвідмовної роботи p(t) і інтенсивністю відмов λ(t); відома як «перший загальний закон надійності».

Залежності інтенсивності відмовлень λ(t) і f(t) від часу роботи об’єкта показано на рис. 2.2 і рис. 2.3 відповідно. Аналіз цих залежностей показує, що функції λ(t) і f(t) мають три ділянки (I-III). Для ділянки I властиве зниження інтенсивності відмов і їх швидке виявлення. Відмови в цей період експлуатації називаються напрацьованими, а час їхнього виникнення – періодом напрацювання. Для ділянки II характерна майже постійна і невисока інтенсивність відмов, зокрема раптових. Цей період називається періодом нормальної експлуатації. Ділянка III функції λ(t) показує різке збільшення відмов, обумовлених поступовою втратою об’єктом первинних властивостей у результаті старіння (їх іменують поступовими або зношеними), а відповідний їм період експлуатації називається періодом зносу, або старіння.

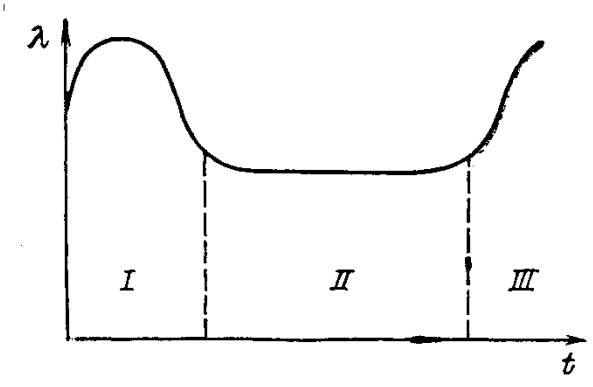


Рис. 2.2. Функція інтенсивності відмов

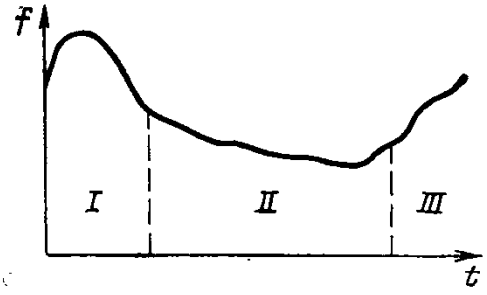


Рис. 2.3. Функція частоти відмов

Знаючи щільність розподілу відмовлень f(t), можна визначити за аналогією з p(t) імовірність відмови Q(t):

$$Q(t) = \int_0^t f(\tau)d\tau \tag{2.16}$$

Оскільки ймовірність безвідмовної роботи p(t) визначають як імовірність події, що протилежна відмові, то

$$p(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(\tau)d\tau = \int_0^\infty f(\tau)d\tau \tag{2.17}$$

Для періоду нормальної роботи

$$\lambda(t)=\lambda_0=\text{const}, \tag{2.18}$$

і тоді

$$p(t)=\exp[-\lambda_0 t], \tag{2.19}$$

а щільність розподілу відмов

$$f(t)=\lambda_0\exp[-\lambda_0 t]. \tag{2.20}$$

Отже, $f(t)<\lambda(t)$ і тільки для високонадійних об’єктів (коли λ_0 мале) ці величини практично рівні.

Формули $p(t)=\exp[-\lambda_0 t]$ та $f(t)=\lambda_0\exp[-\lambda_0 t]$, що характеризують так називаний експонентний закон надійності, дозволяють оцінити ймовірність безвідмовної роботи об’єкта упродовж будь-якого проміжку часу в межах періоду нормальної експлуатації.

Середнє напрацювання апаратури системи PON і її елементів до відмови, або середній час безвідмовної роботи, визначається як математичне очікування працездатності об’єкта і, якщо відомо щільність розподілу відмов f(t), то

$$T_{сер} = M\{\xi_1\} = \int_0^\infty tf(t)dt \tag{2.21}$$

де ξ_1 - випадкове напрацювання об’єкта до першої відмови.

Середнє напрацювання до відмови з урахуванням

$$f(t)=dF(t)/dt=dQ(t)/dt=-dp(t)/dt, \quad (2.22)$$

може бути визначене через імовірність безвідмовної роботи. Інтегруючи за частинами

$$T_{сер} = M\{\xi_1\} = \int_0^\infty tf(t)dt \quad (2.23)$$

і вважаючи, що

$$\lim_{t\to\infty} tp(t) = 0 \text{ і } p(0) = 1, \quad (2.24)$$

маємо

$$T_{сер} = \int_0^\infty p(t)dt \quad . \quad (2.25)$$

Таким чином, середній час безвідмовної роботи дорівнює площі під кривою імовірності безвідмовної роботи.

Для періоду нормальної експлуатації, коли

$$p(t)=\exp[-\lambda_0 t] \quad (2.26)$$

середнє напрацювання до відмови

$$T_{сер} = \int_0^\infty e^{-\lambda_0 t}dt = -\frac{1}{\lambda_0}e^{-\lambda_0 t}\ |_0^\infty = \frac{1}{\lambda_0} = T_0 \quad , \quad (2.27)$$

тобто середнє напрацювання апаратури системи PON і її елементів до відмови чисельно дорівнює величині зворотній інтенсивності відмов, з урахуванням цього імовірність безвідмовної роботи для експонентного закону надійності

$$p(t)=\exp[-t/T_0]. \quad (2.28)$$

Статистична оцінка, середнього напрацювання об’єкта до відмови:

$$T_{сер} = \frac{1}{N(0)}(\xi_1^{\,1} + \xi_1^{\,2} + ... + \xi_1^{\,N(0)}) = \frac{1}{N(0)}\sum_{i=1}^{N(0)}\xi^{\,i} \quad (2.29)$$

де N(0) – це кількість працездатних об’єктів у початковий момент t=0;

$\xi_1^{\,i}$ – реалізація випадкової величини ξ_1 для і-го об’єкта;

ξ_1 – випадкове напрацювання і-го об’єкта до першої відмови.

2.3 Показники надійності відновлюваних об’єктів

Устаткування системи PON є відновлюваним, тобто його експлуатація представляє чергування інтервалів працездатності і простою. У момент простою відбувається відновлення працездатності, і устаткування системи PON знову працює до відмови і т. д.

Моменти відмов устаткування системи PON формують потік відмов, для якого характерний параметр потоку відмов λ(t).

Досвід експлуатації систем PON показує, що щільність розподілу напрацювання між відмовами описується експонентним законом і зміна параметру потоку відмов у часі аналогічна інтенсивності відмов невідновлюваних об’єктів і, отже, можна вважати, що

$$\lambda(t)=\lambda=1/T_0, \tag{2.30}$$

де T_0 – напрацювання на відмову для сталого процесу експлуатації. Таким чином, для найпростішого потоку відмов імовірність безвідмовної роботи, щільність розподілу відмов і напрацювання на відмову відповідно рівні

$$p(t)=\exp(-\lambda t); \tag{2.31}$$

$$f(t)=\lambda\exp(-\lambda t); \tag{2.32}$$

$$T_0=1/\lambda \tag{2.33}$$

Статистична оцінка напрацювання на відмову системи PON або елементів її устаткування

$$T_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_{pi}, \tag{2.34}$$

де n - кількість відмов за відповідний період спостереження;

t_{pi} – напрацювання на і-ту відмову.

Важливим показником відновлюваних об’єктів є час відновлення T_B. Цей показник характеризує середній час відновлення устаткування системи PON.

Статистичну оцінку часу відновлення визначають за формулою:

$$T_{в} = \sum_{i=1}^{n} T_{пі} / \sum_{i=1}^{n} N_{пі}, \quad (2.35)$$

де $T_{пі}$ – час простою;

$N_{пі}$ – кількість простоїв.

Знаючи час відновлення $T_в$, можна визначити інтенсивність відновлення μ. Для випадку експонентного закону розподілу моментів відновлення інтенсивність відновлення

$$\mu=1/T_{в}. \quad (2.36)$$

Працездатність устаткування системи PON характеризує коефіцієнт готовності

$$К_г=T_0/(T_0+T_в), \quad (2.37)$$

де T_0 – час напрацювання на відмову.

Коефіцієнт готовності характеризує відносний час перебування системи PON у справному стані в сталому процесі експлуатації.

Підвищення величини Кг можливе як завдяки зростанню напрацювання до відмови, так і шляхом зменшення тривалості відновлення. Статистична оцінка коефіцієнта готовності в процесі експлуатації визначається за формулою

$$K_{г} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{оі}}{\sum_{i=1}^{n} t_{оі} + \sum_{i=1}^{n} t_{ві}}, \quad (2.38)$$

де $t_{оі}$ – час справної роботи між (і-1)-ою і і-ою відмовами;

$t_{ві}$ – інтервал часу відновлення;

n – кількість відмов за розглянутий період експлуатації.

Коефіцієнт простою

$$К_П =1-К_г =T_В/(T_0+T_в). \quad (2.39)$$

Для оцінки готовності устаткування системи PON у практиці технічної експлуатації широко використовується коефіцієнт справної дії

$$К_с=(T_к-T_п)/T_к, \quad (2.40)$$

де $T_к$ – календарний цикл експлуатації;

$T_п$ – сумарний час простою устаткування системи PON за оцінюваний період.

Коефіцієнт справної дії подібний з коефіцієнтом готовності: відмінність полягає в тому, що $K_с$ враховує простої не тільки через відмови техніки, але й з причини помилок обслуговуючого персоналу й організації технічного обслуговування.

Розглянуті показники надійності є основними в оцінці експлуатаційних властивостей устаткування системи PON і встановлюються технічними умовами (ТУ), контролюються й підтримуються в процесі експлуатації та відіграють важливу роль в оцінці її ефективності.

РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ PON

3.1 Підвищення надійності на етапі проектування та розробки

Підвищення надійності систем PON на етапі проєктування і розробки забезпечують такі засоби та заходи:

1) раціональний вибір принципових схем вузлів і блоків системи PON, реалізованих з використанням найменшої кількості функціонально необхідних елементів;

2) обрання високонадійної електрорадіоелементної бази без особливого підвищення вартості виробів у цілому і при мінімальній номенклатурі ЕРЕ, що дозволить зменшити обсяг запасних частин, їх вартість;

3) вибір оптимальних режимів роботи ЕРЕ в електричних схемах, вимкнення роботи ЕРЕ в умовах, що перевищують допустимі і граничні навантаження. Електричні навантаження оптимальні при значеннях, що не перевищують 25% номінальних;

4) обрання типу конструкції блоку, вузла системи PON, що забезпечують автоматизацію виробництва, уникнення помилок у процесі виготовлення та виконання монтажу;

5) вибір матеріалів конструкцій, що забезпечують мінімальне старіння і максимальну довговічність виробу;

6) технологічність конструкції, тобто якість ЕРЕ, вузлів і конструкції устаткування (стійки, плати, панелі), що дозволяють їх швидке й економічне виробництво на основі автоматизації технологічних процесів;

7) урахування можливостей обслуговуючого персоналу, що мінімізують помилки операторів;

8) застосування автоматичного або автоматизованого контролю параметрів устаткування системи PON, що дозволяє зменшити вартість експлуатації устаткування системи PON і створити основу для прогнозування відмов і

своєчасного вживання заходів щодо заміни або ремонту несправного елемента чи обрання полегшеного режиму його функціонування;

9) легка доступність до ЕРЕ, блоків, панелей, що забезпечує їх швидку перевірку і якісний ремонт.

3.2 Підвищення надійності при виготовленні апаратури систем PON та на етапі технічної експлуатації

При виготовленні апаратури системи PON важливе значення має строге дотримання технології і постійного контролю якості комплектуючих виробів, монтажу і міжблочних з'єднань.

На етапі технічної експлуатації устаткування системи PON надійність забезпечують такі засоби:

1) раціональний вибір комплексу профілактичних заходів, що здійснюються експлуатаційним персоналом на устаткуванні системи PON;

2) обрання оптимального комплекту запасних частин і їх розподіл по магістралі;

3) раціональна архітектоніка системи ремонту пошкоджених блоків;

4) систематичне підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу;

5) підтримка в постійній справності вимірювальної апаратури і пристроїв контролю й перевірки працездатності устаткування системи PON;

6) збір та аналіз інформації про надійність апаратури, розробка заходів з підвищення її експлуатаційної надійності;

7) впровадження нових технічних засобів, перехід на нові алгоритми обслуговування, створення автоматизованих систем технічної експлуатації.

3.3 Резервування як один з ефективних методів підвищення надійності устаткування системи PON

Одним із ефективних способів підвищення надійності обладнання пасивної оптичної мережі (PON) є впровадження резервування. Цей підхід передбачає

використання додаткових елементів та функціональних можливостей, що перевищують мінімально необхідний рівень для забезпечення стабільного функціонування системи. У практиці проєктування та експлуатації PON найчастіше застосовують два основні типи резервування:

1. Загальне резервування – передбачає дублювання об’єкта в цілому, що дозволяє зберегти працездатність у разі повної відмови одного з його екземплярів.

2. Окреме резервування – полягає в резервуванні окремих елементів або підсистем, які є критичними для функціювання всієї мережі.

Залежно від режиму роботи резервних компонентів розрізняють такі варіанти:

1. Навантажений резерв, коли резервний елемент функціонує паралельно з основним у повноцінному режимі.

2. Полегшений резерв, за якого резервна складова працює з меншим навантаженням або виконує допоміжні функції.

3. Ненавантажений резерв, що залишається неактивним до моменту виходу з ладу основного елемента.

Резервування з кратністю одиниця, тобто коли кожен критичний компонент має одного дублера, називається дублюванням і є найпоширенішим методом у системах PON. З огляду на можливості відновлення працездатності резерву існують два підходи:

1. Відновлюваний резерв, коли несправний резервний елемент можна замінити або відремонтувати під час експлуатації.

2. Невідновлюваний резерв, що передбачає одноразове використання резервного ресурсу без можливості його подальшого відновлення.

У більшості випадків у системах PON застосовується навантажений відновлюваний резерв, який забезпечує високий рівень готовності мережі до несправностей і знижує ризик простоїв у разі відмови окремих елементів.

У техніці систем PON в основному застосовуваний навантажений відновлюваний резерв. У цьому разі коефіцієнт готовності може бути визначений за формулою:

$$K_{г.р} = [1 - \frac{(m+M)!}{(M+1)!m!}(1 - K_г)^{(M+1)}],$$

де m – число робочих каналів (трактів); M – число резервних каналів (трактів) на один робочий канал (тракт); $К_г$ – коефіцієнт готовності каналу (тракту) без резервування.

3.4 Надійність і резервування в PON

3.4.1 Часткове резервування з боку центрального вузла

Одним із ключових недоліків PON-систем з базовою деревоподібною архітектурою є відсутність вбудованих механізмів резервування. Найкритичнішою ситуацією в цьому контексті може бути фізичне пошкодження фідерного волокна – сегмента, що з’єднує оптичний лінійний термінал (OLT) із першим розгалужувачем у мережі. Унаслідок такого інциденту повністю втрачається зв’язок з усіма абонентськими терміналами, підключеними через це волокно, що означає одночасне відключення десятків вузлів ONU і, відповідно, сотень кінцевих користувачів. Середній час відновлення з’єднання (MTTR – mean time to repair) у такому разі може значно варіюватися і сягати від кількох днів до декількох тижнів, залежно від організаційних і технічних можливостей оператора зв’язку. У подібних обставинах особливо гостро виявляється вразливість мереж PON порівняно з рішеннями на основі SDH із кільцевою топологією, де вбудовані механізми захисту забезпечують автоматичне переключення на резервний маршрут у разі аварії. З урахуванням цього, питання створення захищених PON-мереж було порушене вже в першій версії рекомендації ITU-T G.983.1 (додаток IV), де розглядалися підходи до побудови резервованих конфігурацій для систем APON. Проте, враховуючи особливості пасивної оптичної архітектури, реалізація таких рішень виявляється значно складнішою, ніж у кільцевих структурах SDH, зокрема через спільне використання зворотного каналу кількома ONU, що ускладнює логіку доступу до середовища передавання в разі аварії. У межах цього дослідження були проаналізовані кілька підходів до побудови резервованих конфігурацій, зокрема

чотири варіанти архітектур. Тепер розгляньмо три найбільш типові схеми реалізації PON із елементами резервування.

Рішення, зображене на рис 3.2, реалізує часткове резервування з боку центрального вузла.

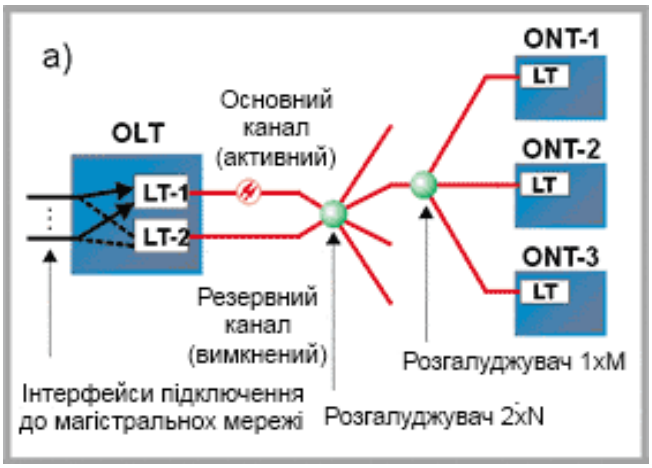


Рис. 3.2. Часткове резервування з боку центрального вузла

Для впровадження цього підходу необхідне використання оптичного розгалужувача типу 2×N. У центральному вузлі передбачено встановлення двох оптичних трансиверів – LT-1 та LT-2, кожен із яких підключений до окремого волокна. У звичайному режимі експлуатації активним є лише основний канал, через який забезпечується дуплексне передавання даних. Резервний канал перебуває в пасивному стані: лазерний випромінювач у модулі LT-2 вимкнений, проте фотоприймач може приймати зворотний трафік. У разі розриву основного волокна система автоматично активує передавальні та приймальні функції LT-2, після чого перемикається відповідний мультиплексор і блок маршрутизації на стороні OLT для забезпечення зв’язку з магістральною мережею. Для підвищення загальної надійності доцільно використовувати фідерні волокна, прокладені в окремих фізичних трасах.

3.4.2 Часткове резервування на рівні абонентського обладнання

Реалізація часткового резервування з боку абонентської частини мережі забезпечує підвищення надійності функціонування окремих користувацьких вузлів. Для цього передбачено встановлення двох незалежних оптичних модулів LT-1 та LT-2 у складі одного ONU. Перемикання між основним і резервним каналами відбувається за тим же алгоритмом, що й при резервуванні на рівні центрального вузла. При цьому немає необхідності обладнувати всі абонентські пристрої резервною лінією – це рішення може впроваджуватись селективно. Завдяки відмінності у вартості обладнання з резервуванням (із двома LT-модулями) та без нього (із одним модулем), оператор отримує змогу пропонувати персоналізовані тарифи, орієнтовані на різні категорії користувачів залежно від вимог до доступності та рівня сервісу.

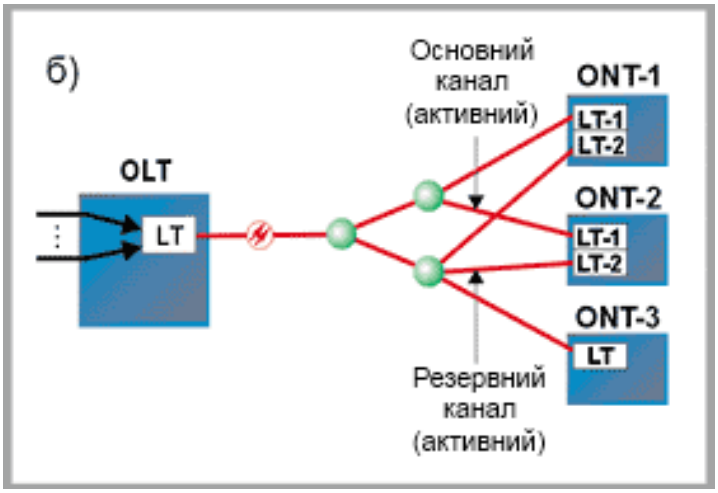


Рис. 3.3. Часткове резервування з боку абонентського вузла

3.4.3 Повне резервування системи PON

На рисунку 3.4 представлено архітектуру, що передбачає повне дублювання всіх критичних елементів мережі PON. Такий підхід забезпечує максимальну стійкість до відмов як з боку оптичних модулів OLT та ONU, так і при фізичному ушкодженні будь-якого відрізка волоконно-оптичної лінії. Передавання даних до абонента відбувається одночасно з двох незалежних LT-модулів, а сигнали надходять на ONU через два паралельні канали. На боці центрального вузла (OLT)

із двох ідентичних потоків лише один спрямовується далі в напрямку магістралі. Аналогічно, у прямому каналі ONT також дублює трафік, проте до кінцевого споживача передається лише одна копія отриманої інформації. У разі аварії або порушення цілісності каналу система автоматично й практично миттєво здійснює перемикання на резервну гілку без втрати зв’язку. Як і у випадку часткового резервування, не всі абонентські вузли обов’язково мають бути підключені до резервної мережі – це може бути реалізовано диференційовано, відповідно до вимог клієнта.

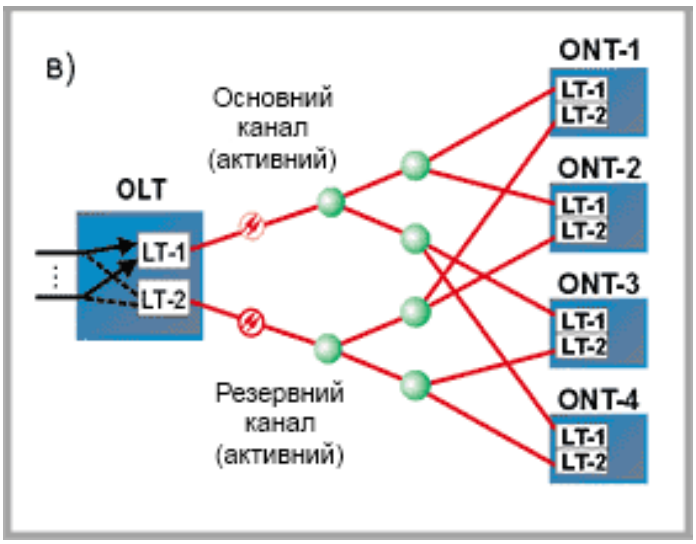


Рис. 3.4. Повне резервування

ВИСНОВКИ

1. У роботі розглянуто принципи функціонування систем пасивних оптичних мереж (PON), їх різновиди, зокрема технології APON/BPON, GPON, Ethernet PON (EPON), а також наведено приклади схем доставки даних і послуг у мережах PON. Проаналізовано переваги та недоліки архітектури PON у порівнянні з альтернативними підходами.

2. Описано показники надійності систем PON. Апаратура й устаткування системи PON належать до систем, що відновлюються, а первинні елементи – до невідновлювальних систем. З огляду на це, у кваліфікаційній роботі проаналізовано показники надійності об’єктів, що не відновлюються: ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмови, щільність розподілу відмов, інтенсивність відмов, середнє напрацювання апаратури системи PON і її елементів до відмови, або середній час функціонування без відмов, а також показники надійності відновлюваних об’єктів.

3. Розглянуті показники надійності є основними в оцінці експлуатаційних властивостей устаткування системи PON, контролюються і підтримуються в процесі експлуатації і відіграють важливу роль в оцінці її ефективності.

4. Докладно проаналізовано комплекс заходів і технічних рішень, спрямованих на підвищення надійності як на етапах проектування й виробництва, так і в процесі технічної експлуатації. Значну увагу зосереджено на одному з найбільш ефективних способів підвищення надійності – резервуванні, яке передбачає використання додаткових елементів або функціональних вузлів, що перевищують мінімально необхідну конфігурацію для забезпечення стабільної роботи системи.

5. Окремо розглянуто найпоширеніші методи резервування в технічних рішеннях систем PON: загальне резервування (резервується об’єкт у цілому) та часткове (резервуються окремі елементи або їхні функціональні групи).

6. У підсумку проаналізовано три типові варіанти архітектури з резервуванням: перший – часткове резервування з боку центрального вузла, другий – часткове резервування на рівні абонентського обладнання, що підвищує надійність вузла користувача, третій – повне резервування всієї системи PON. Останній варіант забезпечує стійкість системи до відмов обладнання як центрального (OLT), так і абонентського (ONT) рівнів, а також до пошкоджень волоконно-оптичної інфраструктури на будь-якій її ділянці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Clavenna S. Metro Optical Ethernet // *Lightreading* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.lightreading.com. Листопад 2000.

2. Delivering E1 G.703 and PRI services over FTTH/B GEPON networks // Joint ITU-T/IEEE Workshop on Carrier-Class Ethernet (From 1 to 10 Gb/s in five years – The EPON Story), Geneva, May 2007.

3. Ethernet Passive Optical Network (EPON). 56 с.

4. IEEE 802.3ah OAM Helps Bridge Ethernet Management Gap // *IEEE Communications Magazine*.

5. IEEE. Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications. IEEE Std 802.3. March 2002.

6. ITU-T. Recommendation G.983.1. Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON).

7. Khermosh L. Managed Objects of Ethernet Passive Optical Networks (EPON) : RFC 4837. July 2007.

8. Kramer G., Mukherjee B., Dixit S., Ye Y. Supporting differentiated classes of service in Ethernet passive optical networks // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. [Без року].

9. On Configuring Logical Links in EPON.

10. Prat J. *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research Towards Unlimited Bandwidth Access*. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya, 2008. 224 p.

11. Пасивні оптичні мережі // Вікіпедія : вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/PON

12. Пасивні оптичні мережі доступу (xPON) : навч. посіб. / П. М. Однорог, Є. В. Михайленко, М. О. Котенко, О. Б. Омецінська ; за ред. В. Б. Катка. Київ: ДУІКТ, 2006. 65 с.

13. Офіційний сайт компанії IC-LINE [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ic-line.ua/wiki/pon-glava1

14. Жураковський Б.Ю., Зенів І.О. Комп’ютерні мережі. Частина 2 Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» та 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізації «Інженерія програмного забезпечення інформаційно управляючих систем » та «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 5,7 Мбайт). Київ. 2020. 372 с. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/711c5672-1178-4033-a9fa-6e70d0a56e10/content