

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження особливостей побудови та забезпечення надійності
функціонування оптичних мереж доступу
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ІМІМ-22-2
Галюк К. А.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Електронні комунікації та
радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма «Інформаційно-мережна
інженерія»
(повна назва освітньої програми)

Керівник к.т.н доц. Харченко Н. А
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до резервування

Зав. кафедри _____ Безрук В.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування

Студент _____ / Галюк К. А./

Керівник _____ / Харченко Н. А./

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Слайди у форматі Power Point – назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи; принцип роботи технології PON; варіанти каскадування технології PON; лінійне представлення мережі GPON; архітектура PON із захистом типу A, B, C, D, W, «захистом сусіда», кільцевим захистом, гібридним захистом; модернізація схем резервування; порівняльна таблиця схем резервування; висновки

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Терміни виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---------------------------------|----------|
| 1 | Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ. | 18.03.2024 | вик. |
| 2 | Підбір літератури за темою роботи | 08.04.2024 | вик. |
| 3 | Виконання розділу 1 | 23.04.2024 | вик. |
| 4 | Виконання розділу 2 | 30.04.2024 | вик. |
| 5 | Виконання розділу 3 | 17.05.2024 | вик. |
| 6 | Виконання розділу 4 | 06.06.2024 | вик. |
| 7 | Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до резервування в ЕК | 20.06.2024 | вик. |

Дата видачі завдання 18 березня 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Харченко Н.А.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 67 с., 24 рис., 5 табл., 15 джерел, 2 додатки

Об'єктом дослідження є: дослідження особливостей побудови та забезпечення надійності функціонування оптичних мереж доступу.

Мета роботи – проведення аналізу характеристик резервування PON для підвищення надійності мережі

У процесі дослідження методів проведено підвищення відмовостійкості у мережах PON шляхом застосування схем резервування. Розглянуті принципи побудови технологій PON.

Проведене дослідження показало що існує багато методів резервування мережі та забезпечення надійності. Залежно від типу топології мережі PON та бюджету, обирається більш оптимальна схема резервування мережі.

ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ, СХЕМИ РЕЗЕРВУВАННЯ, OLT, СПЛІТЕР, PON, GPON, P2MP.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 67 p., 24 figs., 5 tables, 15 sources, 2 appendices

Object of research - investigate the peculiarities of building and ensuring the reliability of optical access networks.

The purpose of the work - analyse the characteristics of PON redundancy to improve network reliability

In the process of researching the methods, fault tolerance in PON networks was increased by using redundancy schemes. The principles of building PON technologies are considered.

The study showed that there are many methods of network redundancy and reliability. Depending on the type of PON network topology and budget, a more optimal network redundancy scheme is selected.

OPTICAL NETWORKS, REDUNDANCY SCHEMES, OLT, SPLITTER, PON, GPON, P2MP.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 10 |
| 1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЇ PON..... | 11 |
| 1.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ І ВИДИ PON | 11 |
| 1.2 ПРИНЦИП РОБОТИ PON..... | 13 |
| 2 ПРИНЦИП ПОБУДОВИ ТЕХНОЛОГІЙ PON..... | 22 |
| 2.1 СХЕМА ОРГАНІЗАЦІЇ ЗВ'ЯЗКУ | 22 |
| 2.2 ПРОЄКТУВАННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ PON | 25 |
| 2.3 РОЗРАХУНКИ ЗАГАСАННЯ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ PON | 25 |
| 2.4 ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ PON..... | 26 |
| 2.5 ВИБІР ТОПОЛОГІЇ МЕРЕЖІ..... | 27 |
| 2.6 РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОГО БЮДЖЕТУ ПОТУЖНОСТІ ТА БЮДЖЕТУ ВТРАТ..... | 30 |
| 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ У МЕРЕЖАХ PON ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ СХЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ..... | 33 |
| 3.1 ЕТАПИ РЕЗЕРВУВАННЯ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ | 33 |
| 3.2 СТАНДАРТИ АРХІТЕКТУРИ РЕЗЕРВУВАННЯ..... | 34 |
| 4 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗЕРВУВАННЯ PON ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕРЕЖІ..... | 43 |
| 4.1 МЕРЕЖНЕ ВІДМОВОСТІЙКЕ СХОВИЩЕ..... | 43 |
| 4.2 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ НЕГОТОВНОСТІ СХЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ..... | 47 |
| ВИСНОВКИ | 51 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ | 53 |
| ДОДАТОК А | 55 |
| ДОДАТОК Б..... | 64 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- CO – Central Office – Центральний офіс;
- CPE – Customer Premise Equipment – Телекомунікаційне обладнання, розташоване в приміщенні клієнта;
- EPON – Ethernet Passive Optical Network – стандарт пасивної оптичної мережі сумісний з технологією Ethernet;
- FITB – Fiber In The Building – Організація розподільної мережі усередині будинку;
- FSAN – Full Service Access Network – Мережа доступу з повним набором послуг;
- FTTB – Fiber to the Building – Волокно до будинку;
- FTTC – Fiber to the Curb – Волокно до мікрорайону, кварталу або групи будинків;
- FTTH – Fiber to the Home – Волокно до будинку (квартири);
- INT – Integrated Network Terminal – Інтегрований мережний термінал;
- IPTV – Internet Protocol Television – нове покоління цифрового інтерактивного телебачення в мережах передачі даних за протоколом IP;
- ODF – Optical Distribution Frame – Оптичний крос високої щільності;
- ODN – Optical distribution node – Оптичний розподільний вузол;
- OLT – Optical Line Terminal – Оптичний лінійний термінал;
- OMCI – ONT Management and Control Interface – інтерфейс управління та контролю ONU;
- ONT – Optical Network Terminal – Оптичний мережний термінал;
- ONU – Optical Network Unit – Кінцевий оптичний мережний блок;
- P2MP – Point-to-Multipoint – Топологія «точка-багато точок»;
- P2P – Point to Point – Топологія «точка-точка»;
- PAU – PON Access Unit – Модуль доступу PON;

PON – Passive Optical Networking – Пасивна оптична мережа;

QoS – Quality of Service – Якість обслуговування;

RBD – Reliability block diagram – Мережне відмовостійке сховище;

RTT – Round Trip Time – Час від моменту надсилання запиту до моменту отримання;

SIM – Service Interface Module – Сервісний інтерфейсний модуль;

SNI – Service Node Interfaces – Інтерфейс сервісних вузлів;

TDM – Time Division Multiplexing – Мультиплексування з поділом за часом;

TDMA – Time Division Multiple Access – Множинний доступ з часовим розподілом;

WDM – Wavelength-division multiplexing – Хвильове спектральне мультиплексування;

ВОЛЗ – Волоконно-оптична лінія зв'язку;

ОВ – Оптичне волокно;

ВСТУП

У сучасному світі інформаційні технології відіграють вирішальну роль у розвитку різних галузей економіки та соціального життя. Зростаючі вимоги до швидкості та якості передачі даних стимулюють розвиток телекомунікаційних мереж, особливо оптичних мереж доступу. Оптичні мережі надають значні переваги порівняно з традиційними мідними мережами, такі як висока пропускна здатність, стійкість до електромагнітних завад, зниження затримок та підвищена надійність.

Одним із ключових аспектів впровадження оптичних мереж доступу є забезпечення їх надійності та безперервного функціонування. Надійність мережі визначається її здатністю підтримувати безперебійний зв'язок і відновлювати роботу після виникнення збоїв або пошкоджень. Враховуючи критичну роль телекомунікаційних мереж у сучасному суспільстві, дослідження методів підвищення надійності оптичних мереж доступу є надзвичайно актуальним. Основою сучасних оптичних мереж доступу стали технології пасивних оптичних мереж, оскільки саме вони забезпечують економічно ефективний спосіб доставки високошвидкісного інтернету та інших послуг до кінцевих користувачів. Також дозволяють розділяти один оптичний волоконний кабель між багатьма абонентами, що значно знижує витрати на інфраструктуру та обслуговування.

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження особливостей побудови оптичних мереж доступу, аналіз їхніх переваг та недоліків, а також розробка рекомендацій щодо забезпечення надійності їх функціонування. Робота включає вивчення сучасних технологій PON, аналіз топології мереж, аналіз характеристик резервування PON для підвищення надійності мережі, та дослідження методів підвищення відмовостійкості у мережах PON.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЇ PON

1.1 Характеристики і види PON

Пасивна оптична мережа (PON) — це волоконно-оптична телекомунікаційна технологія, яка забезпечує передачу кількох послуг, таких як дані, голос і відео, через одне оптичне волокно від центрального офісу постачальника послуг (CO) до приміщення кінцевого користувача. На відміну від традиційних оптоволоконних архітектур «точка-точка», PON використовує топологію «точка-багатоточок» або P2MP, що значно зменшує кількість необхідного оптоволоконна та обладнання [1].

Технологія PON набула широкого поширення в різних мережах широкопasmового доступу завдяки своїй ефективності, масштабованості та економічній ефективності. Він забезпечує з'єднання з високою пропускнуою здатністю для домашніх, корпоративних і мобільних користувачів, задовольняючи постійно зростаючий попит на широкопasmові послуги.

Технологія PON представляє значний прогрес у волоконно-оптичних телекомунікаціях, пропонуючи ефективні та економічно вигідні рішення для надання послуг високошвидкісного широкопasmового зв'язку приватним, корпоративним і мобільним користувачам.

Технологія PON сягає корінням у традиційні волоконно-оптичні телекомунікації, які спочатку покладалися на з'єднання «точка-точка» або P2P між центральним офісом постачальника послуг (CO) та окремими приміщеннями клієнтів. Розробка технології PON з'явилася як рішення для подолання обмежень архітектур «точка-точка», таких як високі витрати на розгортання, обмежена масштабованість і неефективне використання оптоволоконних ресурсів. Технологія PON використовує пасивні оптичні компоненти, такі як

розгалужувачі та з'єднувачі, щоб забезпечити економічно ефективний спільний доступ до волоконно-оптичної інфраструктури між кількома користувачами [1].

Розробка стандартів PON зіграла вирішальну роль у широкому впровадженні технології PON у телекомунікаційній галузі. Було створено консорціум для реалізації ідеї множинного доступу по одному волокну, який отримав назву FSAN (Full Service Access Network). Метою FSAN було розроблення загальних рекомендацій і вимог до обладнання PON для того, щоб виробники обладнання та оператори могли співіснувати разом на конкурентному ринку систем доступу PON. Підсумком роботи FSAN стала низка стандартів PON, які приведені у таблиці 1.1 [1].

Таблиця 1.1 - Види стандартів технології PON

| Тип | APON | BPON | GPON | EPON (GEPON) | 10GEPON (XG-PON) | NG-PON2 |
|------------------------------|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------------------|---|
| Найменування | ATM Passive Optical Network | Broadband PON | Gigabit PON | Ethernet PON | 10 Gigabit Ethernet PON | Next-Generation Passive Optical Network 2 |
| Стандарт | ITU-T G.983 | ITU-T G.983 | ITU-T G.984 | IEEE 802.3ah | IEEE 802.3av, ITU-T G.987 | ITU G.989 |
| Смуга пропускання downstream | 155 Мбіт/с | 622 Мбіт/с | 2,488 Гбіт/с | 1,244 Гбіт/с | 9,95 Гбіт/с | 9,95 Гбіт/с |
| Смуга пропускання upstream | 155 Мбіт/с | 155 Мбіт/с | 1,244 Гбіт/с | 1,244 Гбіт/с | 2,488 Гбіт/с | 2,488 Гбіт/с (9,95 Гбіт/с) |
| Ємність гілки | 32 | 32 | 128 | 32 | 256 | 256 |
| Максимальна довжина передачі | 20 км | 20 км | 60 км | 20 км | 100 км | 100 км |

APON і BPON морально застаріли ще під час створення, GPON не надто розвинений через високу вартість, а також через органічне небажання багатьох працювати зі швидкостями 2.5G, 10GEPON поки що перебуває на стадії розроблення. Ще є EPON, але 100 Мбіт для сучасного часу вистачить хіба що для десятка користувачів, а обладнання за ціною не сильно відрізняється від старшого побратима GEPON. У підсумку залишається тільки GEPON, який на

сьогоднішній день відповідає вимогам більшості провайдерів для підключення віддалених абонентів, швидкість передачі становить 1 Гбіт, при цьому, на одному волокні можуть перебувати до 64 кінцевих пристроїв мережі [2].

GPON є однією з найпоширеніших технологій PON, яка пропонує симетричну пропускну здатність до 2,5 Гбіт/с у вихідному каналі та 1,25 Гбіт/с у вихідному каналі. Він підтримує численні служби, включаючи широкосмуговий інтернет, передачу голосу через IP (VoIP) і IPTV. GPON використовує мультиплексування з розділенням часу (TDM) для динамічного розподілу пропускну здатності між кількома користувачами [2].

EPON, також відома як GEPON (пасивна оптична мережа, Gigabit Ethernet), базується на стандартах Ethernet і забезпечує симетричну пропускну здатність до 1 Гбіт/с у вихідному та вихідному напрямках. EPON добре підходить для надання послуг на основі Ethernet, таких як доступ до Інтернету, IP-телефонія та потокове відео. Він використовує кадри Ethernet для передачі даних, спрощуючи інтеграцію з існуючими мережами Ethernet [2].

XG-PON – це еволюція GPON, яка пропонує вищу пропускну здатність, підтримуючи симетричні швидкості до 10 Гбіт/с у вихідному та 10 Гбіт/с у вихідному. XG-PON розроблений, щоб задовольнити зростаючий попит на програми, що потребують інтенсивної пропускну здатності, такі як потокове відео високої чіткості, хмарні обчислення та віртуальна реальність.

Ці стандарти визначають специфікації для різних аспектів систем PON, таких як інтерфейси фізичного рівня, архітектури протоколів і процедури керування, забезпечуючи взаємодію та сумісність між обладнанням різних постачальників.

1.2 Принцип роботи PON

Технологія PON складається з трьох основних компонентів, це:

1. Оптичний лінійний термінал (Optical Linear Terminal, OLT), який розташований у центральному офісі постачальника послуг, служить

центральною точкою мережі PON. Він керує вихідним і низхідним трафіком між мережею постачальника послуг і блоками оптичної мережі (ONU), розташованими в приміщеннях клієнта. Також OLT контролює розподіл смуги пропускання та забезпечує якість обслуговування (QoS) для різних типів трафіку [3].

2. Оптичний мережевий блок (Optical Network Unit, ONU), яку також іноді називають оптичний мережевий термінал (Optical Network Terminal, ONT) — це спеціалізовані ONU, розроблені для розгортання оптоволокна до дому (FTTH). Вони забезпечують інтерфейси для підключення обладнання в приміщеннях клієнтів (CPE), такого як комп'ютери, телефони та телевізори, до мережі PON. ONU перетворює оптичні сигнали в електричні для розподілу всередині приміщення і навпаки. Він спілкується з OLT для передачі та отримання даних, голосу та відео. Є моделі ONU з комбінованим оптичним портом для телебачення і даних, з портами для телефонії (SIP), з різною кількістю мідних портів, з Wi-Fi – адаптером, а також комбінації всіх перерахованих вище. Кожна ONU має вбудований фільтр MAC-адрес, під час отримання пакета ONU перевіряє приналежність пакета, якщо пакет належить не їй, відкидає його [3].

3. ODN містить пасивні оптичні компоненти, такі як оптичні волокна, розгалужувачі та з'єднувачі, які з'єднують OLT з ONU. На відміну від традиційних активних мереж Ethernet, PON не вимагають живлення обладнання в розподільчій мережі, що робить їх більш економічно ефективними та простими в обслуговуванні. Центральним пристроєм у мережі PON є OLT, розгорнутим у центральному офісі або центрі обробки даних постачальника послуг. Він агрегує трафік від кількох ONU та з'єднується з базовою мережею постачальника послуг. Як правило, OLT встановлюються в стійку з високою щільністю портів і підтримкою різних технологій PON, таких як GPON, EPON і XG-PON [4].

Вони оснащені інтерфейсами висхідної лінії зв'язку, такими як Gigabit Ethernet або 10 Gigabit Ethernet, для підключення до магістральної мережі постачальника послуг. Також OLT підтримують розширені функції, такі як

якість обслуговування (QoS), формування трафіку та тегування VLAN, щоб забезпечити ефективне та безпечне надання послуг.

ONU розташовані в приміщеннях клієнта і служать інтерфейсом між оптичним волокном і пристроями користувача (рис. 1.1). Вони зазвичай встановлюються в приміщенні та підключаються до OLT через пасивні оптичні розгалужувачі або з'єднувачі. ONU випускаються в різних форм-факторах, включаючи автономні блоки, внутрішні настінні блоки та зовнішні блоки для розгортання в суворих умовах. Вони підтримують кілька інтерфейсів, таких як порти Ethernet, телефонні порти та відеоінтерфейси, для підключення різних типів обладнання в приміщеннях клієнтів.

ONU надаються та керуються дистанційно постачальником послуг за допомогою протоколів керування, таких як OMCI (ВОЛЗ Management and Control Interface).

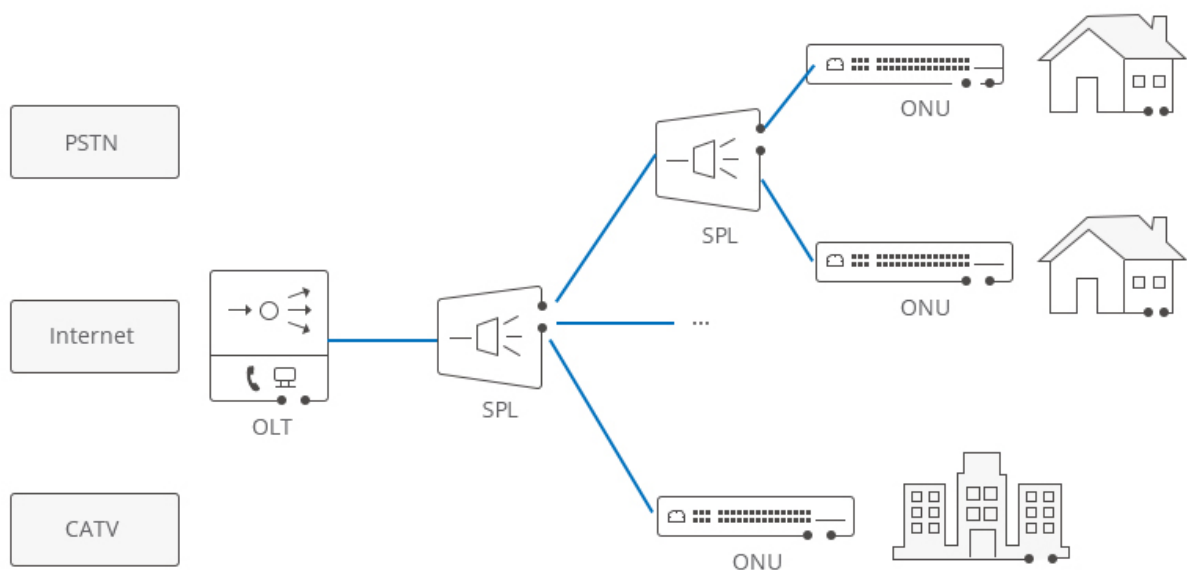


Рисунок 1.1 – Кінцевий оптичний мережний блок (ODN)

Архітектура «точка-багато точок», де один OLT обслуговує кілька ONU, розташованих у різних приміщеннях клієнта. Низхідний трафік від OLT транслюється на всі ONU, тоді як висхідний трафік від ONU передається в режимі множинного доступу з розділенням часу (TDMA) або множинного

доступу з розділенням довжин хвиль (WDMA), щоб уникнути конфліктів і забезпечити ефективне використання смуги пропускання [4].

Зазвичай архітектура «точка-багато точок» використовується в мережах широкосмугового доступу для надання високошвидкісного інтернету, голосових і відеопослуг приватним і бізнес-користувачам.

При цьому низхідний трафік передається на довжині хвилі 1490 нм, а висхідний, на довжині хвилі 1310 нм. Зроблено це для того, щоб залишити місце для CATV (аналогове телебачення), яке також можна пустити по дереву PON до абонента. Передавачі CATV віщають на довжині хвилі 1550 нм або 1310 нм, але виробники GPON обладнання зайняли довжину хвилі 1310 нм для UpStream, щоб зробити клієнтський пристрій дешевшим [2].

EPON базується на стандартах Ethernet і використовує його кадри для передачі даних між OLT і ONU. В архітектурі EPON кілька ONU підключаються до одного OLT через пасивні оптичні розгалужувачі або з'єднувачі. EPON підтримує симетричну пропускну здатність до 1 Гбіт/с у низхідному та висхідному напрямках, що робить його придатним для надання послуг на основі Ethernet, таких як доступ до інтернету та IP-телефонія [2].

GPON є однією з найпоширеніших технологій PON, яка пропонує вищу пропускну здатність порівняно з EPON. При використанні архітектури GPON, OLT спілкується з ONU за допомогою протоколів множинного доступу з розділенням часу (TDMA), що дозволяє ефективно розподіляти пропускну здатність між кількома користувачами. GPON підтримує асиметричну пропускну здатність із вищою швидкістю низхідного потоку (до 2,5 Гбіт/с), ніж вихідного потоку (до 1,25 Гбіт/с), зазвичай використовується в розгортаннях оптоволокна до будинку (FTTH) і оптоволокна до будівлі (FTTB) для надання послуг високошвидкісного інтернету, IPTV і VoIP [4].

Архітектура PON з мультиплексуванням за довжиною хвилі – це вдосконалена архітектура PON, яка використовує технологію мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) для передачі кількох сигналів по одному волокну (рис. 1.2). Різним ONU розподіляються різні довжини хвилі

світла, що забезпечує одночасну передачу вихідного та низхідного трафіку на різних довжинах хвиль.

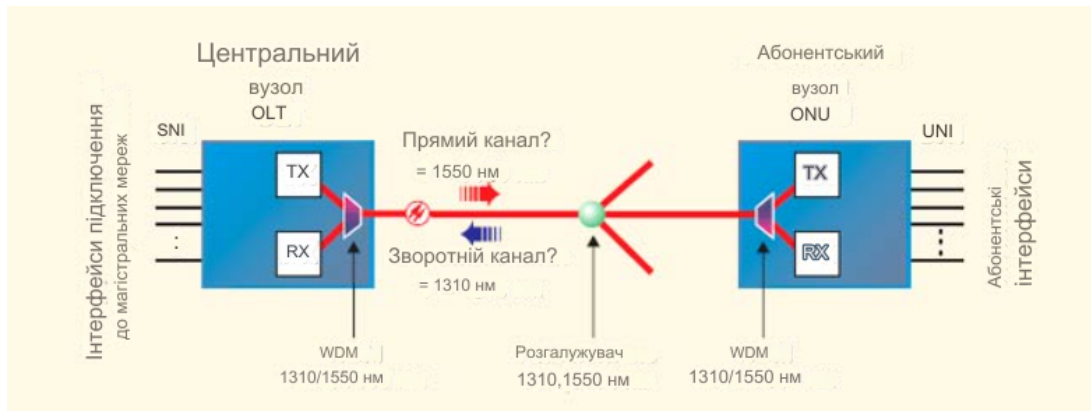


Рисунок 1.2 – Інтерфейси підключення до магістральних мереж

Слід окремо розглянути технологію обміну даними між ONU і OLT (рис. 1.3):

- будь-яка ONU мовить тільки в момент часу, відведений для неї OLT;
- для будь-якої ONU в мережі OLT визначає часовий проміжок, протягом якого ONU може віщати;
- новопідключена ONU взаємодіє з OLT за протоколом MPCP (Multi-Point Control Protocol – протокол управління багатоточковим обміном);
- будь-яка ONU не може зв'язуватися з іншими ONU без участі у зв'язку OLT. Усі пакети для будь-якого адресата централізовано обробляє один пристрій у мережі, це OLT [3].

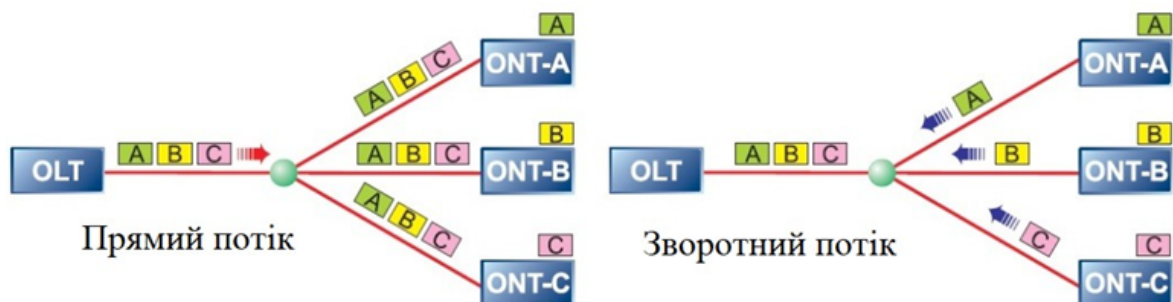


Рисунок 1.3 – Розподіл часових проміжків між ONU

Для підтримки присвоєння часових доменів за допомогою OLT, групою IEEE 802.3ah було розроблено протокол MPCP. Цей протокол базується на двох повідомленнях Ethernet: GATE і REPORT. Повідомлення GATE надсилається від OLT до ONU і використовується для присвоєння тимчасового домену. Повідомлення REPORT використовується ONU для інформування OLT про свій стан (заповненість буфера тощо), щоб допомогти йому ухвалити правильне рішення про виділення тимчасового домену. Як GATE, так і REPORT-повідомлення є кадрами управління MAC (тип 88-08) [3].

Існує два режими роботи MPCP: автодетектування (ініціалізація) і нормальний режим. Режим автодетектування використовується для детектування ново під'єднаних ONU і визначення Round Trip Time, RTT – час від моменту надсилання запиту до моменту отримання RTT і MAC-адреси цього ONU. Нормальний режим використовується для присвоєння тимчасових доменів усім ONU, що ініціалізуються.

Стандартні Ethernet-кадри в PON трохи модифікуються під специфіку роботи в розділюваному за принципом TDM-середовища, однак OLT модифікує пакети, що виходять з PON, та ми маємо на виході стандартний Ethernet-потік. У зворотному напрямку ситуація аналогічна [3].

Остаточний алгоритм роботи мережі PON після налаштування має такий вигляд:

- ONU «слухає лінію»;
- OLT отримує пакет стандарту IEEE 802.3 і модифікує його під стандарт IEEE P802.3ah;
- OLT відсилає пакет конкретному адресату (ONU);
- усі ONU отримують пакет, але тільки адресат залишає його собі – інші пакет відкидають;
- ONU модифікує пакет стандарту IEEE P802.3ah під стандарт IEEE 802.3 і віддає його клієнтському ПК;

- ONU з клієнтського ПК, модифікує їх зі стандарту IEEE 802.3 під стандарт IEEE P802.3ah і буферизує;
- OLT дозволяє передачу даних конкретній ONU;
- ONU віщає певну кількість часу, а потім замовляє і знову «слухає» лінію;
- OLT отримує від ONU пакет стандарту IEEE P802.3ah, модифікує його під стандарт IEEE 802.3, після чого передає його вищому пристрою [4].

Алгоритм роботи мережі PON з перетворення пакетів з одного стандарту в інший (рис. 1.4):

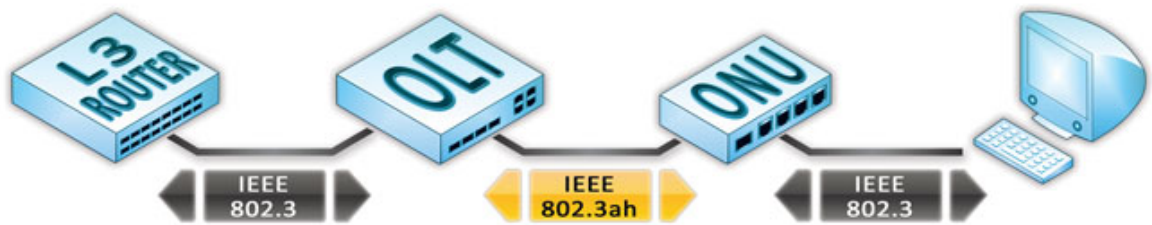


Рис. 1.4 – Алгоритм роботи PON з перетворення пакетів

Технологія PON знаходить застосування в різних мережах широкопasmового доступу (рис. 1.5), включаючи волокно до дому (FTTH), волокно до будівлі (FTTB), волокно до розподільчої шафи (FTTC).

Розгортання FTTH особливо поширене в міських і приміських районах, надаючи високошвидкісний інтернет, голосові та відео послуги безпосередньо в житлових будинках і квартирах. Розгортання FTTB обслуговує багатоквартирні будинки, офісні будівлі, кондомініуми та готелі, шляхом розширення оптоволоконного підключення до центральної точки розподілу в будівлі.

Технологія PON пропонує кілька переваг порівняно з традиційними мережами доступу на основі міді, включаючи вищу пропускну здатність, довшу охоплення, меншу затримку та стійкість до електромагнітних перешкод (EMI) і радіочастотних перешкод (RFI). Також PON є більш екологічно чистими та

енергоєфективними, вимагаючи менше енергії та виробляючи менше викидів парникових газів порівняно з активними мережами Ethernet [5].

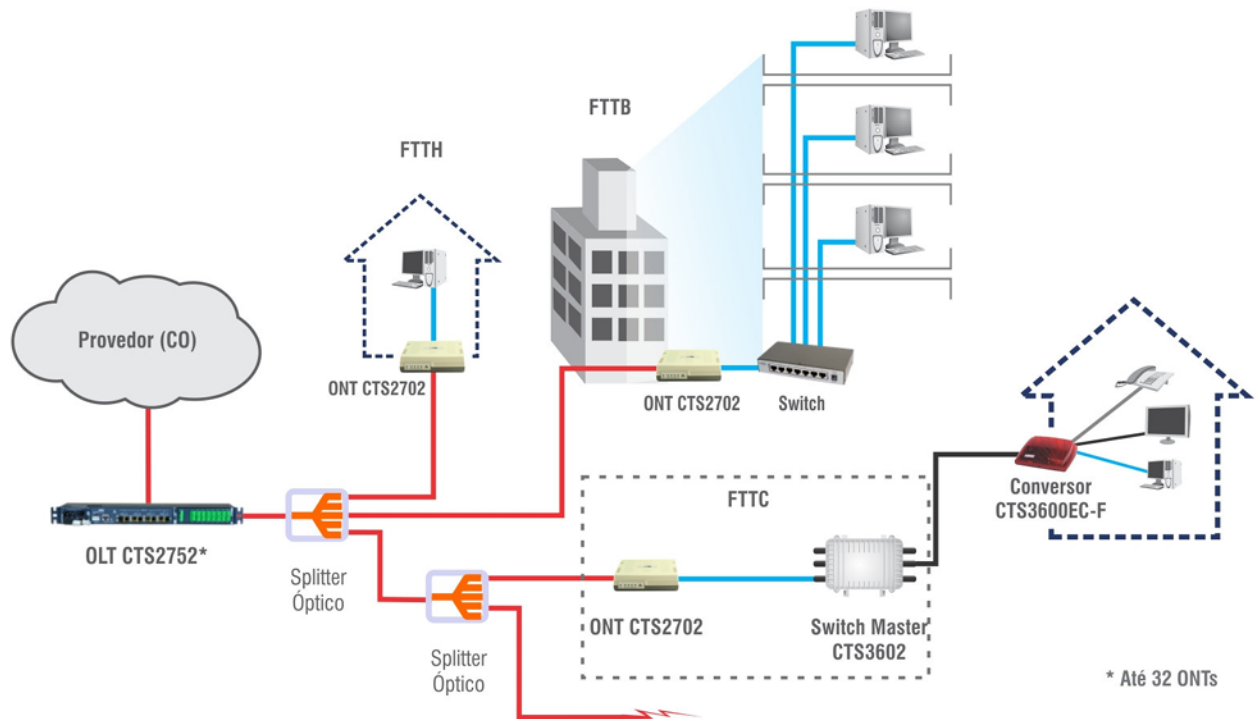


Рисунок 1.5 – Схема підключення FTTH

У класичному FTTH для підключення, наприклад, 256 абонентів у приватному секторі необхідно 256 оптичних волокон. При використанні GPON для цього ж завдання необхідно всього 4 волокна, один OLT з SFP модулями (8 штук, з них 4 на Ethernet UpLink, 4 на PON DownLink), 256 ONU (по одній кожному клієнту, живляться вони прямо від клієнтської розетки), а також набір сплітерів і PON-муфти для роботи з кабелем і розміщенням в них цих самих сплітерів, а іноді і самих ONU. Робота адміністратора зводиться тільки до управління OLT. Живлення потрібно тільки на стороні абонента і в серверній [2].

Крім того, мережі PON мають високу масштабованість і перспективність, здатні підтримувати нові технології та програми, такі як 5G, інтернет речей (IoT) і розумні міста [2].

Загалом, технологія PON являє собою значну зміну парадигми мереж широкопasmового доступу, пропонуючи операторам і постачальникам послуг економічно ефективно та масштабоване рішення для надання високошвидкісних широкопasmових послуг для задоволення зростаючих потреб домашніх, бізнес-користувачів і мобільних користувачів.

2 ПРИНЦИП ПОБУДОВИ ТЕХНОЛОГІЙ PON

2.1 Схема організації зв'язку

Проектування мережі PON починається з визначення мережевих вузлів, на яких буде розміщене активне обладнання і від яких будуватиметься кабельна мережа до квартир абонентів.

АТС містить мережевий вузол, район обслуговування якої, в основному, визначається і зоною охоплення мережею PON. Активне шлюзове обладнання PON, в якості якого виступає OLT, пов'язує кінцеве обладнання абонентів з мережею Інтернет та іншими медіаконтентами для організації послуги передавання голосу, даних і відео (рис. 2.1).

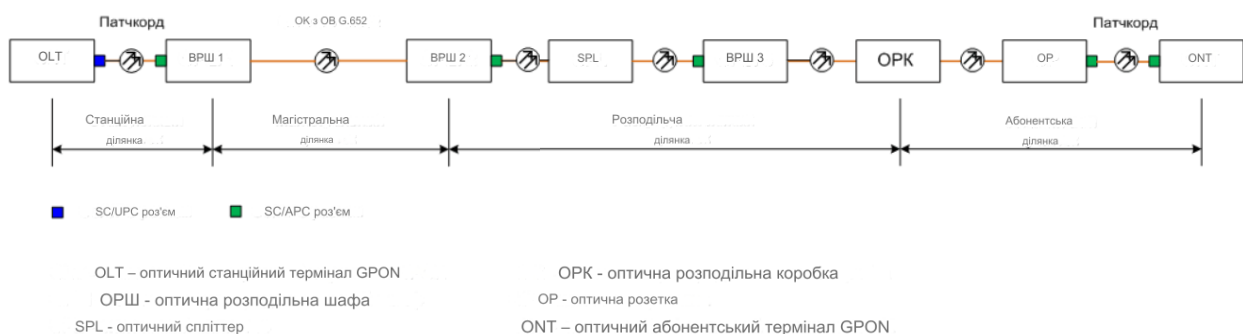


Рисунок 2.1 – Структурна схема лінійної частини мережі GPON

Вхідні порти PON обладнання OLT підключаються до оптичного кросу ODF OLT за допомогою оптичних шнурів (патч-кордів) або окінцьованих мікрокабелів.

Оптичний крос призначений для розподілу кабелів за напрямками, перехрещується і з'єднання зі станційним оптичним кабелем через слайс-пластини, тобто касети і бокси для зварних з'єднань. Як правило, оптичний крос розташовується в тому ж приміщенні АТС, де і розміщується стійка з OLT [2].

На ділянці мережі PON від АТС до оптичної розподільчої шафи (ОРШ), що знаходиться в зоні обслуговування АТС, проводиться магістральний розподіл волокон. З іншого боку, каскадування дає змогу гнучкіше й оптимальніше розташувати розподільні пристрої та кабелі, тобто оптимально побудувати розподільну мережу.

Станційна ділянка: в оптичний лінійний термінал GPON, встановлюються SFP GPON модулі з роз'ємами SC/UPC. Для зменшення зворотних відображень в оптичній лінії зв'язку, які можуть призвести до виникнення нелінійних ефектів, у мережах GPON використовуються конектори SC/APC. Магістральний оптичний кабель заводиться в оптичну розподільчу шафу (ОРШ 1), в якій оптичні волокна цього кабелю за допомогою пігтейлів розшиваються на панелі з роз'ємами SC/APC. Порти GPON OLT підключаються до роз'ємів ОРШ 1 за допомогою оптичних патчкордів SC/UPC-SC/APC.

Магістральна ділянка: на магістральній ділянці відсутні роз'ємні з'єднувачі, залежно від довжини цієї ділянки можуть використовуватися нероз'ємні з'єднання у вигляді зварювання оптичного волокна або механічних з'єднувачів.

Розподільна ділянка: магістральна ділянка закінчується на об'єкті в ОРШ 2, в якому на панелі з оптичними роз'ємами за допомогою пігтейлів виведені оптичні волокна магістрального кабелю. З іншого боку до даних роз'ємів підключаються сплітери. Вихідні порти спліттерів підключаться до оптичних роз'ємів ОРШ 3, до яких з іншого боку за допомогою пігтейлів під'єднані некритичні до малих радіусів вигину оптичні волокна вертикального розподільного кабелю (G.657A). Конструктивно ОРШ 2 і ОРШ 3 можуть бути виконані у вигляді одного ОРШ з окремими розподільними панелями і місцем для розміщення спліттерів. Виділення волокон на поверххах виконується в оптичних розподільних коробках (ОРК), у яких з'єднуються волокна розподільного та drop-кабелю. Останній також містить оптичне волокно G.657A і використовується на ділянці від ОРК до оптичної розетки у квартирі клієнта.

Абонентська ділянка: у квартирі клієнта встановлюється оптична розетка з конектором SC/APC, до якого через пігтейл підключається drop-кабель. Абонентський термінал клієнта ONT підключається до оптичної розетки за допомогою оптичного патчкорду SC/APC-SC/APC.

Оптичний бюджет лінії зв'язку – максимально можливе загасання в оптичній лінії зв'язку між передавачем і приймачем, за якого цю лінію можна використовувати за призначенням [6].

Загасання оптичної лінії зв'язку – сума всіх можливих втрат від передавача до приймача оптичного сигналу.

Абонентський вузол ONT містить вхідний оптичний інтерфейс PON і може мати різні вихідні інтерфейси: FXS, FXO, 10/100/1000 Base-T, E1, BRI, RF. Наявність зазначених інтерфейсів абонентських терміналів, технологія та ресурси смуги пропускання дають змогу використовувати мережу PON і для під'єднання різноманітних відомчих мереж та корпоративних клієнтів.

Магістральна мережа абонентського доступу є основним елементом усієї пасивної мережі. Правильний вибір системи побудови мережі та її топології, визначення умов і принципів організації доступу дадуть змогу оптимізувати витрати на розвиток мережі надалі.

Питання проектування магістральної мережі PON пов'язані з такими основними положеннями:

- топологія побудови магістральної мережі;
- максимальна ємність магістральних кабелів та тип кабелю;
- способи резервування на магістральній мережі;
- спосіб прокладання магістрального кабелю по будівлі АТС;
- вибір і монтаж оптичних муфт;
- вибір і монтаж оптичної розподільчої шафи ОРШ. Комплектація ОРШ [5].

2.2 Проектування розподільчої мережі PON

Проектування PON мережі можна чітко розділити на 3 етапи:

1. Збір вихідних даних.
2. Аналіз вихідних даних і складання концепції проекту.
3. Розроблення проектної документації.

По-перше це ділянка мережі від ОРШ до кабельного вводу в житловий будинок – схеми розташування розподільчих ділянок мережі PON. По-друге прокладка кабелю та розміщення розподільчих пристроїв безпосередньо в житловому будинку – схеми кабельних введів мережі PON.

Проектування розподільчої мережі це – розміщення оптичних розподільчих коробок (ОРК) по під'їздах і поверхах, розміщення ОРК у під'їздах будинків, розміщення та увімкнення розгалужувачів, прокладання кабелю в житлових будинках і способи його резервування, вибір розподільного кабелю, способи резервування розподільчої мережі [1].

Абонентська проводка – ділянка кабельної мережі від ОРК до оптичних розеток у квартирі абонента, як правило, не входить до складу робочих креслень проекту і виконується силами оператора зв'язку в міру підключення абонентів. Але в проекті має розглядатися спосіб під'єднання абонентів і розміщення абонентського терміналу ONT у квартирі.

2.3 Розрахунки загасання оптичної мережі PON

Розрахунки загасання виконуються для оптичної лінії від підключення волокна на активному обладнанні до найвіддаленішого абонента тобто на приймачі. У пасивній мережі PON джерелами втрат є повне загасання в оптичному волокні, це залежить від його довжини і коефіцієнта загасання волокна на певній довжині хвилі.

Повні втрати в зварених з'єднаннях, залежать від втрат у кожному місці з'єднання та їхньої загальної кількості.

Повні втрати в з'єднувачах (роз'ємні з'єднання), залежать від втрат у кожному з'єднувачі та їх загальної кількості. Втрати в розгалужувачах волокон, залежать від коефіцієнта розгалуження. Штрафні втрати (втрати на вигини кабелів під час прокладання). Сума всіх втрат, що виникають на ділянці оптичної мережі, являє собою енергетичний бюджет загасання. Крім того, під час розрахунків слід враховувати й експлуатаційний запас [5].

2.4 Пристрої та компоненти PON

До основних виробів і компонентів пасивної оптичної мережі належать (рис. 2.2):

- оптичні кабелі магістральної, розподільчої мережі та абонентської проводки;
- оптичний крос високої щільності для встановлення на АТС (ODF OLT);
- оптичні розподільні шафи (ОРШ);
- оптичні розподільні коробки (ОРК);
- оптичні абонентські розетки (РА);
- оптичні розгалужувачі (сплітери);
- мультиплексори WDM і атенюатори;
- різні патч-панелі та аксесуари.

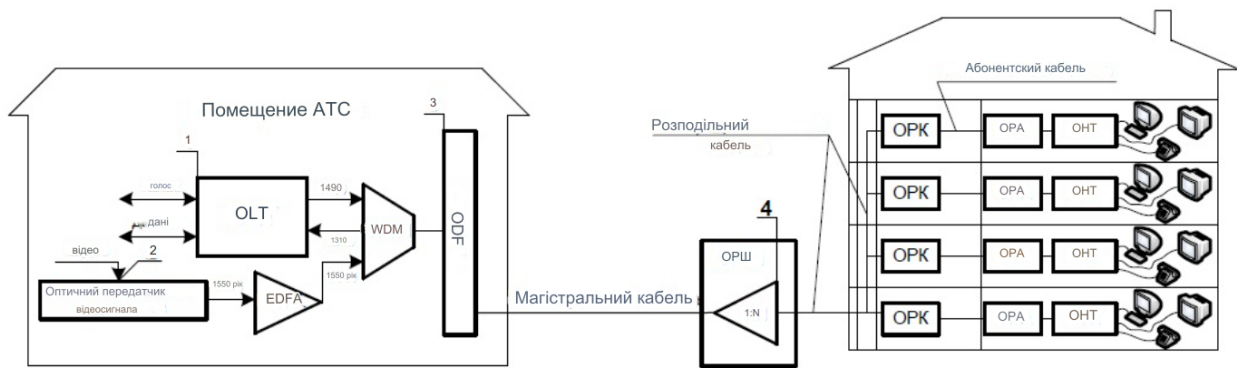


Рисунок 2.2 – Схема пасивної оптичної мережі

Точка приєднання 1 – надання оператором А оператору Б можливості надання абоненту послуг з передавання голосу, даних, IP-телебачення в каналі передавання даних оператора А.

Точка приєднання 2 – надання оператором А оператору Б можливості надання абоненту послуг з трансляції телевізійних програм у цифровому каналі передавання даних оператора А.

Точка приєднання 3 – виділення оператором А оператору Б окремих ОВ у магістральному кабелі оператора А.

Точка приєднання 4 – надання оператором А оператору Б розподільчої та абонентської ділянок оператора А або виділення оператором А (власником чи володільцем розподільчої ділянки) оператору Б окремих ОВ у розподільчому кабелі.

Оператор А є основною експлуатуючою організацією PON, оператор Б - оператором-орендатором[6].

2.5 Вибір топології мережі

Архітектура мережі залежить від безлічі умов, і насамперед – від щільності розміщення абонентів. Але орієнтовно можна висловитися за застосування системи FTTB для багатоповерхових житлових будинків. Для приватної забудови або офісів, залежно від платоспроможності замовника і його потреби у високошвидкісних додатках, більше підійде FTTC або FTTH.

У сучасних оптичних мережах доступу можуть використовуватися різні топології мережі, які приведено на рис. 2.3.

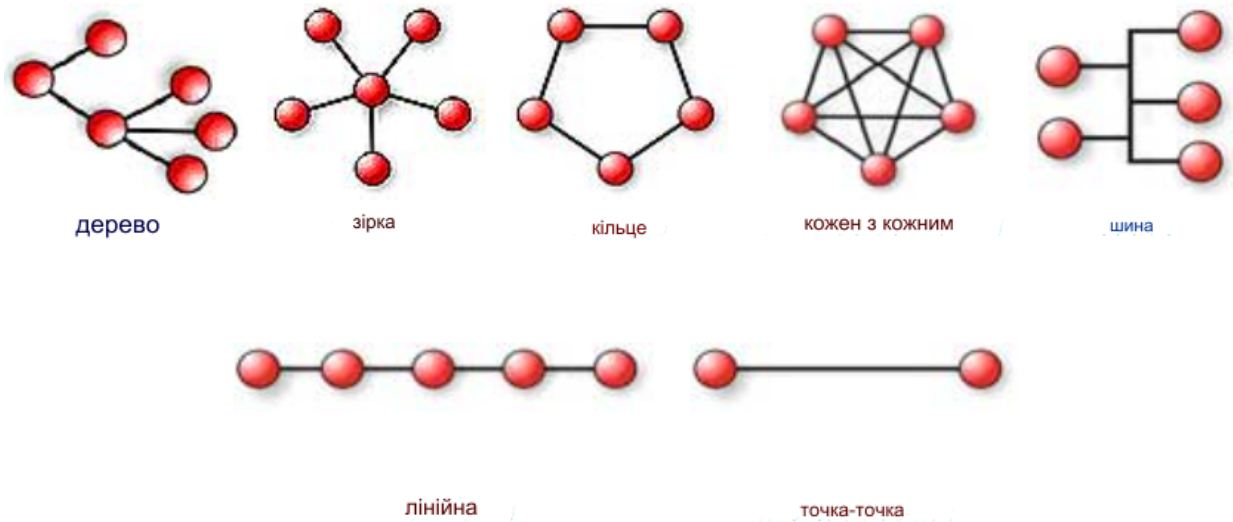


Рисунок 2.3 – Види топології з'єднання вузлів

Деревоподібна топологія (рис. 2.4) є найпопулярнішою та традиційною, гнучкою і зрозумілою з великим потенціалом для нарощування абонентської бази.

Найчастіше «дерево» будуються на PLC-спліттерах, які каскадом підключаються один до одного. Залежно від того, скільки спліттерів розташовано в каскаді, розрізняють 1х, 2х, 3х ... рівневі дерева.

Оптичний розгалужувач – це пасивний оптичний багатополіусник, що розподіляє потік оптичного випромінювання в одному напрямку і об'єднує кілька потоків у зворотному напрямку. У загальному випадку у розгалужувача може бути M вхідних і N вихідних портів. У мережах PON найчастіше використовують розгалужувачі $1 \times N$ з одним вхідним портом. Розгалужувачі $2 \times N$ можуть використовуватися в системі з резервуванням по волокну(...). За робочою смугою пропускання розгалужувачі поділяються на стандартні одновіконні, широкосмугові одновіконні і двовіконні (1310/40нм і 1550/40нм). Для мереж PON використовуються тільки двовіконні розгалужувачі. У

вказаних робочих вікнах характеристики розгалужувача мають бути стабільними [3].

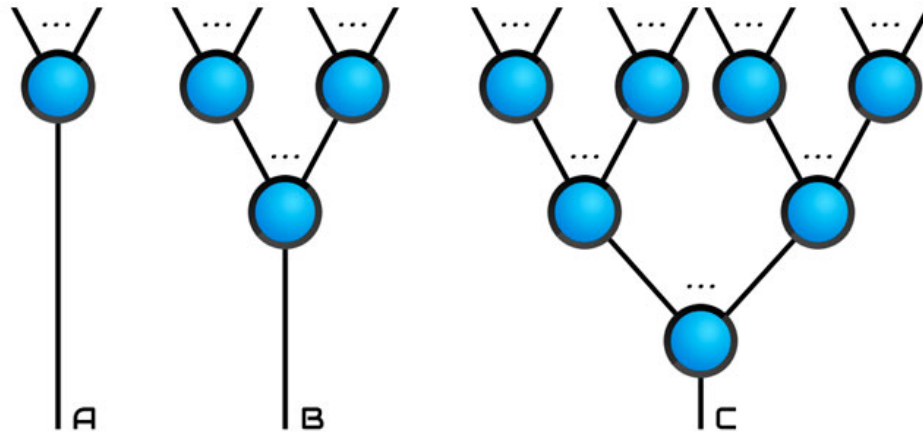


Рисунок 2. – Представлено кілька дерев із різною кількістю вузлів каскадування:

а) 1х каскадне дерево; в) 2х каскадне дерево; с) 3х каскадне дерево.

Під час опису деревоподібних топологій часто використовують такі позначення як «1x4+1x16» або «1x2+1x4+1x8» тощо. Це позначення каскаду спліттерів. Наприклад, запис «1x4+1x16» позначає 2х рівневе дерево з корневим сплітером 1x4 і абонентськими сплітерами 1x16 [4].

Відсоток проникнення (PP – percent of penetration) або відсоток охоплення абонентів є важливою частиною будь-якого проекту комп'ютерної мережі. Перед початком проектування мережі доступу, необхідно визначити, скільки потенційних абонентів готове до неї підключитися. Їхня кількість залежить від багатьох факторів, а саме присутність інших інтернет сервіс провайдерів (ISP) в даному районі, що підключають абонентів за технологією PON. Тип домоволодінь: дачний кооператив, приватні будинки сільського, міського типу, котеджне селище. Вартість підключення, тарифні плани, абонентська плата [4].

Під час вибору відсотка проникнення потрібно враховувати той факт, що PON мережу будують на оптичних спліттерах із кількістю виходів, кратною

ступеню двійки (існують нестандартні сплітери - 1x3, 1x6, 1x12, 1x24, однак їх використовують не дуже часто).

Ця обставина є дуже важливою і диктує певні умови при виборі відсотка проникнення. Сенс у тому, що в PON хороша масштабованість досягається тільки шляхом подвоєння абонентської бази [6-8].

2.6 Розрахунок оптичного бюджету потужності та бюджету втрат

Для того, щоб побудувати дерево PON, необхідно враховувати насамперед оптичні втрати, які приносить пасивне обладнання. Теоретично, PON може покрити територію радіусом 20 км, але на практиці усе залежить від бюджету втрат на конкретній гілці дерева. Для розрахунків необхідно керуватися найгіршими показниками загасань, чутливості та потужності випромінювання передавачів [6].

Після планування конфігурації GPON дерева необхідно виконати розрахунок бюджету оптичної лінії зв'язку. Цільовим критерієм під час розрахунку GPON дерева є виконання такої умови:

$$\Delta P > \alpha_{max} , \quad (2.1)$$

де

ΔP , дБ – оптичний бюджет лінії;

α_{max} , дБ – максимально можливе загасання в GPON дереві, загасання оптичної лінії зв'язку на ділянці від передавача до найвіддаленішого приймача.

Якщо умова виконується, то лінія спроектована правильно і може використовуватися в комерційній експлуатації. В іншому разі необхідно змінити структуру мережі GPON і виконати повторний розрахунок лінії таким чином, щоб умова виконувалася, практична межа для порівняння рівна 30 дБ, в деяких випадках без врахування втрат при старінні обладнання розрахунки повинні не перевищувати 28 дБ.

Оптичний бюджет лінії визначається таким чином:

$$\Delta P = T_x - (-R_x), \quad (2.2)$$

де

ΔP , дБ – оптичний бюджет лінії;

T_x , дБм – рівень потужності передавача;

R_x , дБм – чутливість приймача.

Максимально можливе загасання в GPON дереві визначається для найдовшої ділянки від ONT до OLT (для uplink потоку) за такою формулою:

$$\alpha_{max} = \sum_{j=1}^N \alpha_{PCi} + \sum_{j=1}^M \alpha_{NPCj} + \sum_{k=1}^P \beta_k + \sum_{l=1}^Q l_k \cdot k_\lambda + \xi \quad (2.3)$$

де,

α_{PCi} , дБ – втрати на роз'ємному з'єднанні (конекторах);

α_{NPCi} , дБ – втрати на нероз'ємному з'єднанні (зварювання ОВ, механічні з'єднувачі);

β , дБ – втрати, які вносить оптичний спліттер;

l , км – довжина оптичної лінії зв'язку;

k_λ , дБ/км – коефіцієнт загасання оптичного волокна на довжині хвилі λ ;

ξ , дБ – експлуатаційний запас.

Стандартно під час розрахунків використовують таблиці загасань для спліттерів (табл. 2.1), приймають 0.05дБм загасання на зварюванні, 0.36дБм/км загасання у волокні на довжині хвилі 1310нм (для 1550нм загасання у волокні дорівнює 0.22дБм/км), загасання на механічному з'єднанні приймають рівним 0.5дБм, загасання на перегині варіюється від 0.15дБм до 7дБм і більше [6].

Експлуатаційний запас обумовлений деградацією джерела оптичного випромінювання в процесі експлуатації з часом.

Наступний крок – розрахунок оптичного бюджету потужності, але його можна прийняти рівним 30дБм (виробник гарантує оптичний бюджет потужності, що дорівнює 30дБм).

Таблиця 2.1 – Довідкові дані, які використовуються при розрахунку оптичного бюджету

| Параметр | Значення |
|--|-------------------|
| Втрати на роз'ємних з'єднаннях (конекторах) | 0.15...0.3 дБ |
| Втрати на нероз'ємних з'єднаннях (зварні) | 0.05...0.07 дБ |
| Коефіцієнт загасання одномодового оптичного волокна SMF (G.652) на довжині хвилі $\lambda=1310$ нм | 0.34...0.4 дБ/км |
| Коефіцієнт загасання одномодового оптичного волокна SMF (G.652) на довжині хвилі $\lambda=1490$ нм | 0.22...0.27 дБ/км |
| Эксплуатационный запас | 3 дБ |

Якщо бюджет втрат нижчий за бюджет потужності – дерево буде працездатним, в іншому разі можливі проблеми.

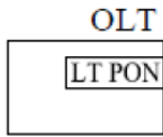
Слід зазначити, що під час розрахунку PON, в якому використовується CATV і зварні ділянки, слід враховувати, що телевізійний сигнал має потужність від 7 дБм до 24 дБм, а на телевізійний приймач цей сигнал має надійти з мінімальною потужністю – 12дБм [7-8].

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ У МЕРЕЖАХ PON ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ СХЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ

3.1 Етапи резервування пасивних оптичних мереж

Виділяють три етапи еволюції підходів до резервування пасивних оптичних мереж. Першим етапом заведено вважати стандарт, описаний у рекомендації G.983.1. Головна ідея цього стандарту полягає в дублюванні елементів мережі, що дає змогу отримати необхідні коефіцієнти готовності, однак використання цього стандарту потребує великі капітальні витрати. Головним завданням, яке вирішували на другому етапі, пошук способів зниження капітальних витрат у розрахунку на одного користувача мережі. Було розроблено кільцеві структури, наприклад структури із «захистом сусіда», схеми на основі самовідновлення та інші. Крім необхідності зниження капітальних витрат у розрахунку на одного користувача необхідно вирішувати завдання щодо зниження експлуатаційних витрат, пов'язаних із забезпеченням побудови відмово стійких мереж доступу. Це третій етап, що стосується створення відмово стійких і ефективних мереж доступу [7].

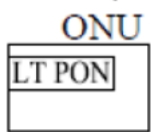
Введемо такі графічні позначення:



- оптичний лінійний термінал, де LT PON-порт входу/виходу на стороні OLT;



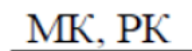
- пасивний оптичний спліттер (Passive Optical Component, POC) виду 1:N;



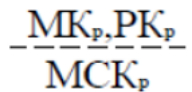
- оптичний мережевий пристрій, де LT PON-порт входу/виходу на стороні ONU;



- оптичний перемикач виду 1:2;



- основне оптичне волокно, де МК – магістральний кабель, РК – розподільний кабель;



- резервне оптичне волокно, де МКр – магістральний кабель, РКр – розподільний кабель, МСКр – між'єднувальний кабель.

3.2 Стандарти архітектури резервування

До архітектури резервування, розроблених у рекомендації G.983.1, належать схеми резервування типу А, В, С, D. Загальний принцип усіх схем резервування – це дублювання всіх або ж частини компонентів. Вони відрізняються ступенем резервування PON, вартістю і складністю реалізації [8].

Тип резервування А. Для цього типу резервування дублюється тільки магістральний кабель. Топологія PON із захистом типу А на рис. 3.1.

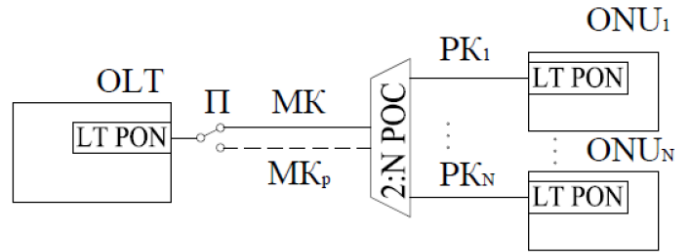


Рисунок 3.1 – Архітектура PON із захистом типу А

У разі виявлення обриву OLT перемикається з робочого магістрального кабелю на резервний через оптичний перемикач (П) виду 1:2, розташований на OLT. При цьому на час перемикання сигнал пропадає.

Тип резервування В дублює загальну частину PON, а саме МК, і оптичні інтерфейси на OLT, розташованому в центральному офісі (Central Office – CO). У цьому разі основний OLT працює в нормальному режимі, а резервний OLT, працює у режимі очікування (ненавантажений резерв). Для перемикання сигналу з робочого інтерфейсу на резервний використовується селектор. При цьому на час перемикання сигнал пропадає. Топологія PON із захистом типу В представлена на рис. 3.2 [9].

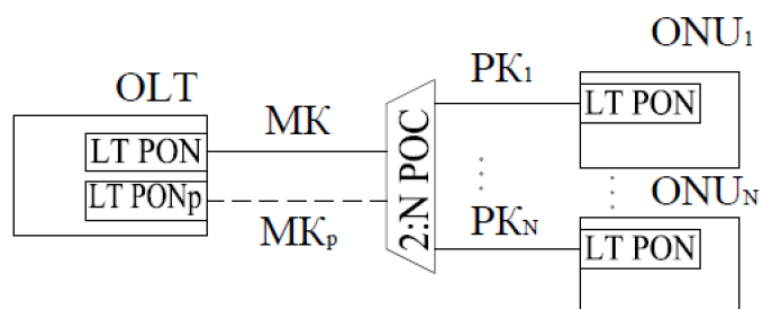


Рисунок 3.2 – Архітектура PON із захистом типу В

Порівняно зі схемою А у схемі В забезпечується додатковий захист від відмов інтерфейсу OLT.

Тип резервування С – це захист із повним дублюванням мережі (1+1). У цьому випадку обидва OLT працюють у нормальному режимі, тобто резервний

OLT перебуває в навантаженому резерві, що забезпечує швидкий час відновлення. Топологія PON із захистом типу С на рис. 3.3.

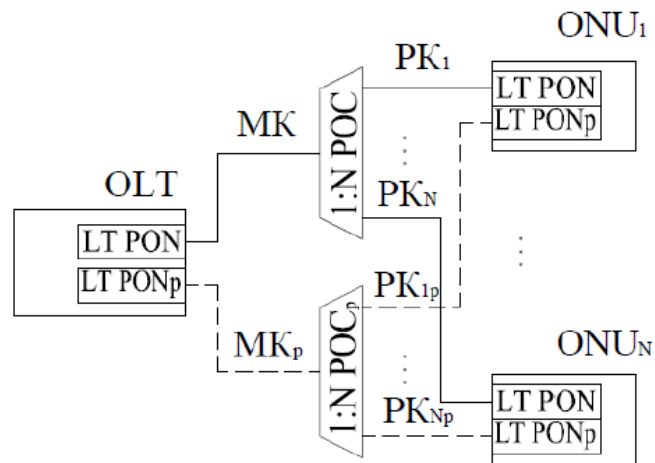
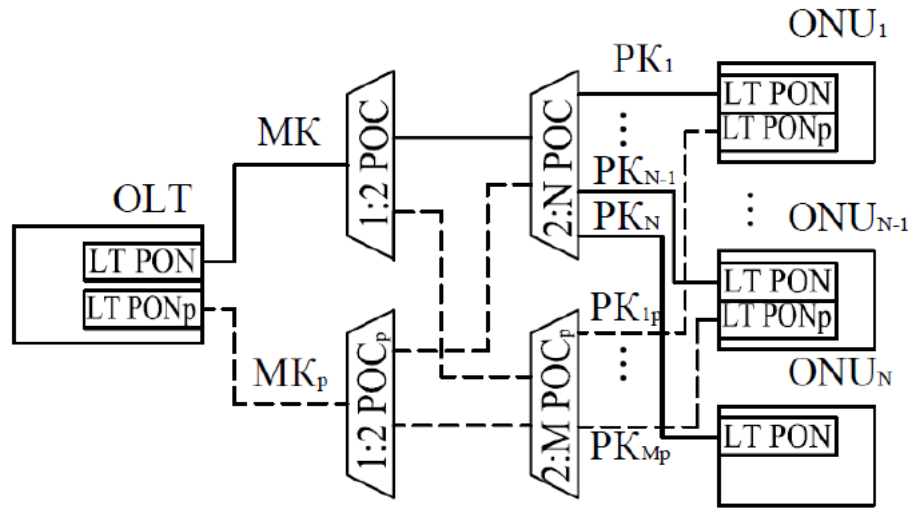


Рисунок 3.3 – Архітектура PON із захистом типу С

Тип резервування D забезпечує незалежне дублювання МК і РК, що дає змогу створити повний (D_1) або частковий (D_2) захист. Захист типу D_1 розроблено переважно для бізнес-користувачів, а D_2 – для приватних клієнтів. В обох випадках основний і резервний OLT працюють у нормальному режимі, тобто резервний OLT перебуває в навантаженому резерві, що забезпечує швидкий час відновлення. Топології PON із захистом типу D_1 і D_2 представлені на рис. 3.4 [8].

У рекомендації G.983.5 як основних варіантів резервування розглядаються типи В і С, описані в G.983.1. Тип В у рекомендації G.983.5 повністю відповідає G.983.1, в той час як тип С у рекомендації G.983.5 передбачає можливість наявності на мережі як захищених, так і незахищених OLT і ONU.

Рекомендація G.989.1 розроблена у 2013 році для мереж наступного покоління (Next Generation PON, NG-PON2) зі швидкістю 40 Гбіт/с. Тут розглядаються захисти типу В і С, а також нова категорія резервування – тип W. Для резервування типу W пропонуються такі варіанти: 1:n; (n+1):n; 2n:n. Як приклад на рис. 3.5 представлено захист W 2n:n.



ONU_1 – підключено за схемою з повним захистом D_1

ONU_{N-1} – підключено за схемою з повним захистом D_1

ONU_N – підключено за схемою з частковим захистом D_2

Рисунок 3.4 – Архітектури PON із захистом типу D_1 та D_2

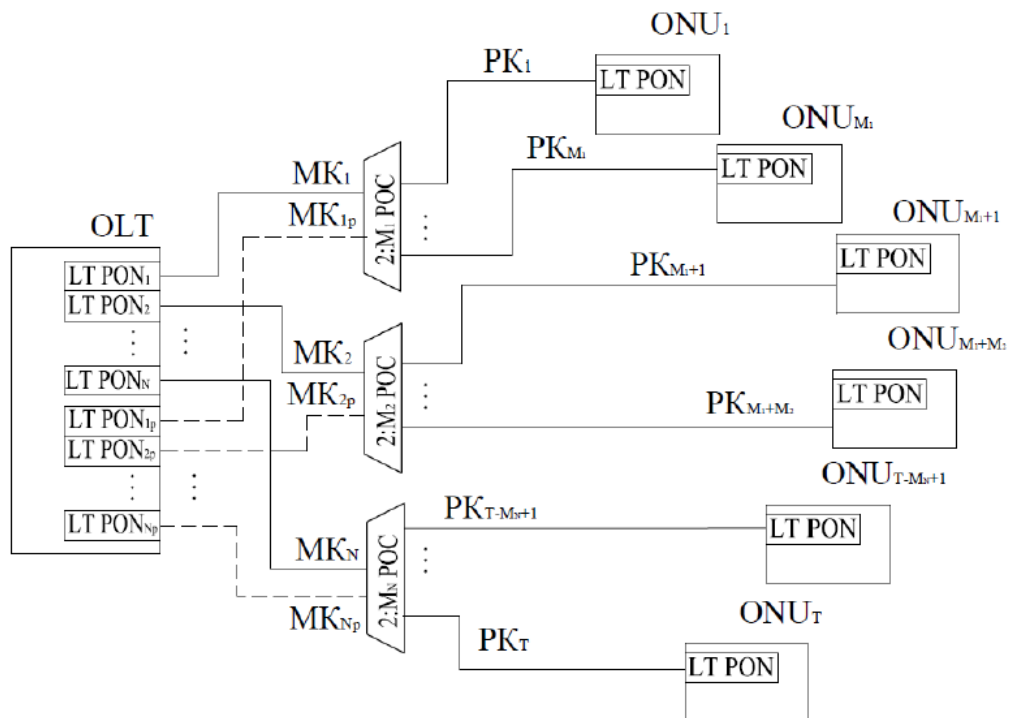


Рисунок 3.5 – Архітектура PON із захистом типу W. Модель 2n:n

Тут OLT підрозділяються на дві групи – робоча і резервна. Якщо відмова сталася в робочій групі, резервна забезпечить зв'язок, сповістивши про необхідність перебудови ONU на частоти резервного OLT.

Зростання вимог до показників надійності тягне за собою і пошуки нових більш економічних реалізацій надійних мереж[9].

PON із «захистом сусіда» (Neighboring Protection – NP). Основним принципом «резервування сусіда» є те, що два сусідніх ONU захищають один одного під час використання з'єднувальних волокон. Два географічно непересічних волокна дають змогу захистити МК від обриву між OLT і віддаленим вузлом (Remote Node, RN). Кожні два сусідніх ONU утворюють пару для здійснення резервування розподільчих волокон. Ця схема резервування економічна, оскільки дає змогу знизити витрати на розгортання волокон у PON. Топологія PON із «захистом сусіда» представлена на рис. 3.6 [9].

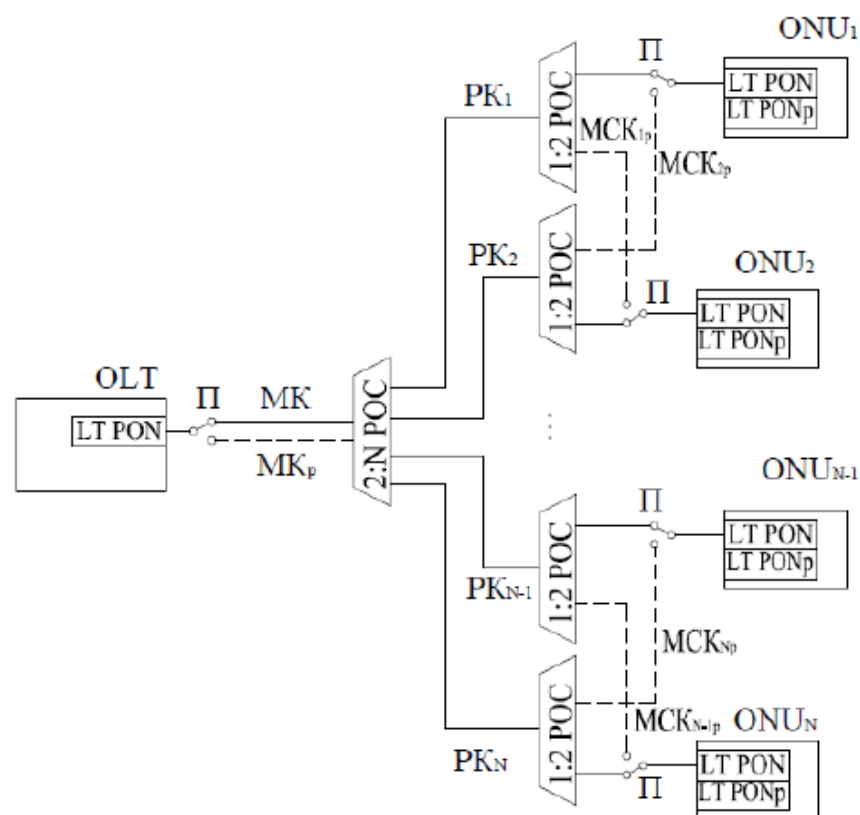


Рисунок 3.6 – Архітектура PON з «захистом сусіда»

PON із захистом на основі одного кільця (Single Ring – SR). Щоб уникнути значного дублювання оптичного середовища, використовується кільцева топологія. У цьому разі реалізовано кільце на рівні фідера, дерево на рівні оптичної розподільчої мережі для кожного користувача. У разі відмови на будь-якій ділянці кільця магістральна ділянка мережі починає функціонувати згідно з деревоподібною топологією. Архітектура PON із захистом на основі одного кільця представлена на рис. 3.7 [9].

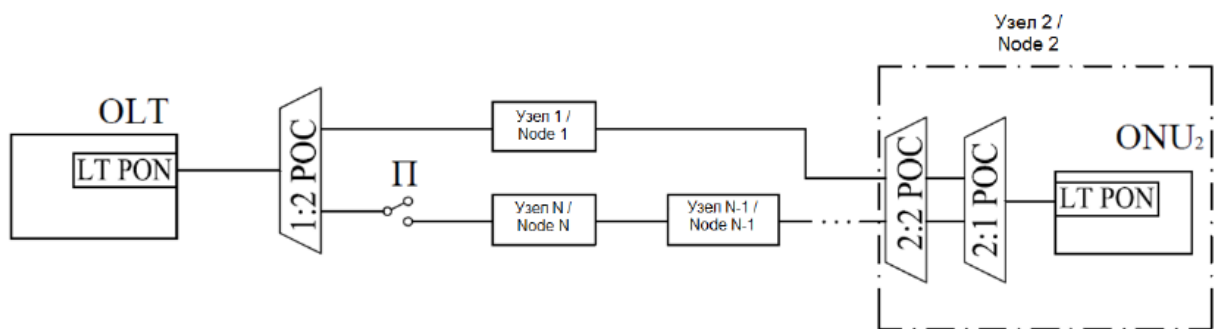


Рисунок 3.7 – Архітектура PON із захистом на основі одного кільця

PON із захистом на основі подвійного кільця (Dual Ring – DR). У цьому разі реалізовано кільце на рівні фідера і кільце на рівні ODN для кожного користувача. У разі відмови на будь-якій ділянці кільця ця ділянка мережі починає функціонувати згідно з деревоподібною топологією. Архітектура PON із захистом на основі подвійного кільця представлена на рис. 3.8.

PON із гібридним захистом на основі дерева та зіркоподібного кільця (Hybrid Tree-and-ring-based – HT). Ця архітектура використовує гібридну технологію, ґрунтуючись на топології дерева на рівні фідера і топології зіркоподібного кільця на рівні ODN. Щоб уникнути дорогого дублювання розподільного кабелю, ця архітектура доповнюється між з'єднувальними волокнами. Топологія PON з гібридним захистом HT представлена на рис. 3.9 [9].

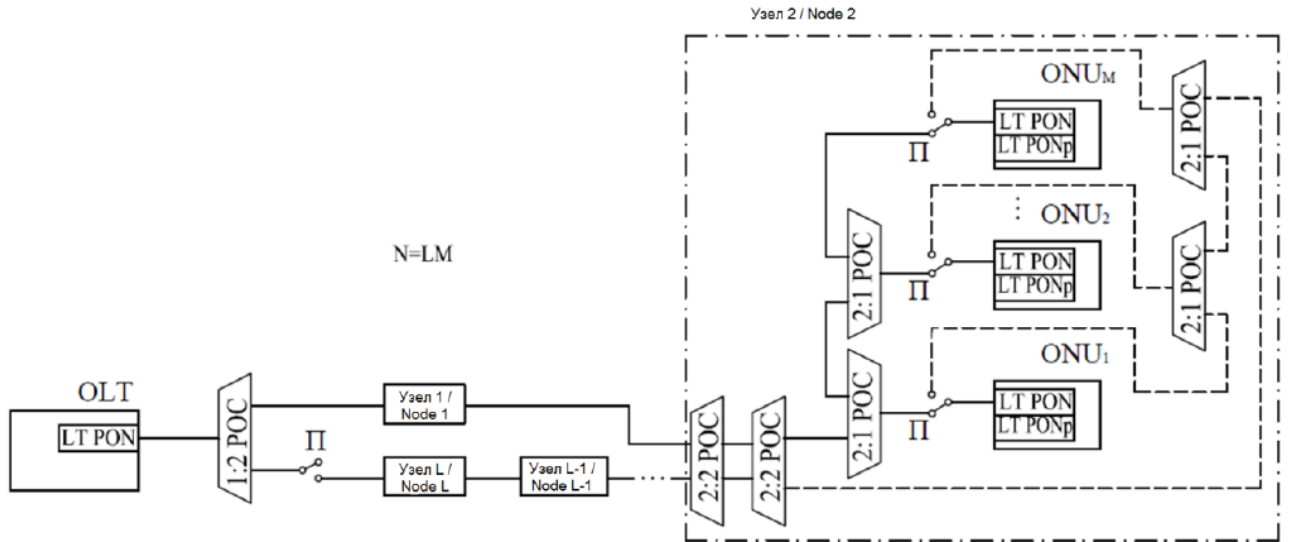


Рисунок 3.8 – Архітектура PON із захистом на основі подвійного кільця

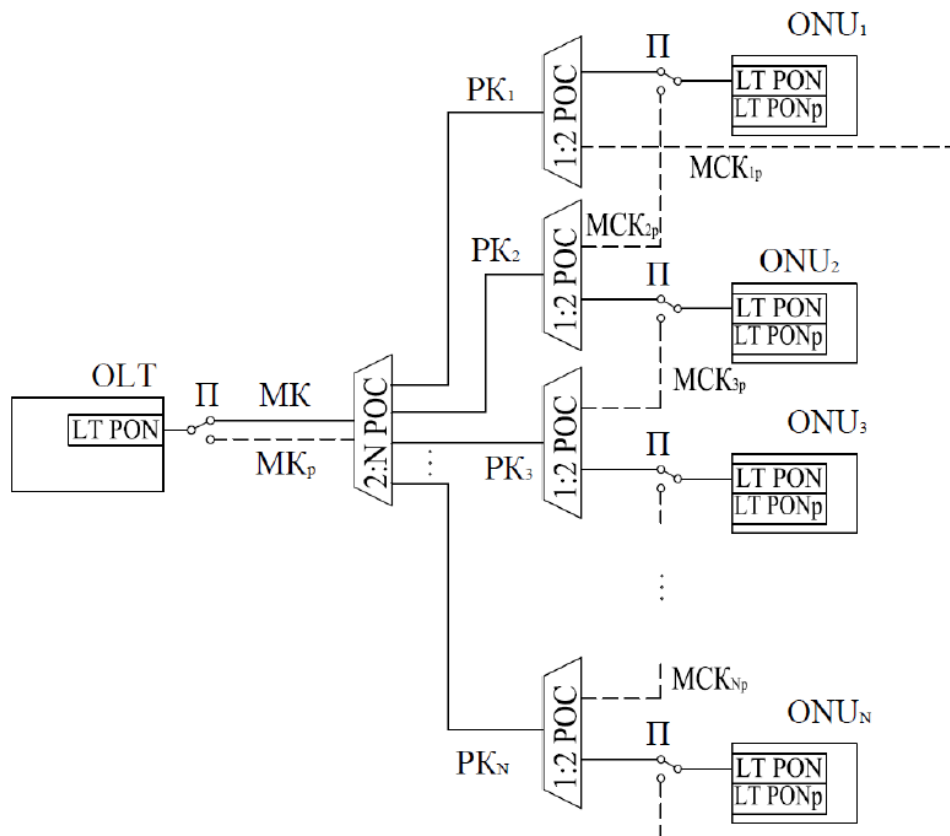


Рисунок 3.9 – Архітектура PON з гібридним захистом НТ

PON із гібридним захистом на основі кільця та зіркоподібного кільця (Hybrid Ring-star-based – HR). Ця архітектура використовує гібридну технологію на основі топології кільця на рівні фідера і топології зіркоподібного кільця на

рівні ODN. У разі відмови на будь-якій ділянці кільця ця ділянка мережі починає функціонувати згідно з деревоподібною топологією. Аналогічно з попередньою схемою, щоб уникнути дорогого дублювання розподільного кабелю, ця архітектура доповнюється між з'єднувальними волокнами. Топологія PON з гібридним захистом HR представлена на рис. 3.10 [9].

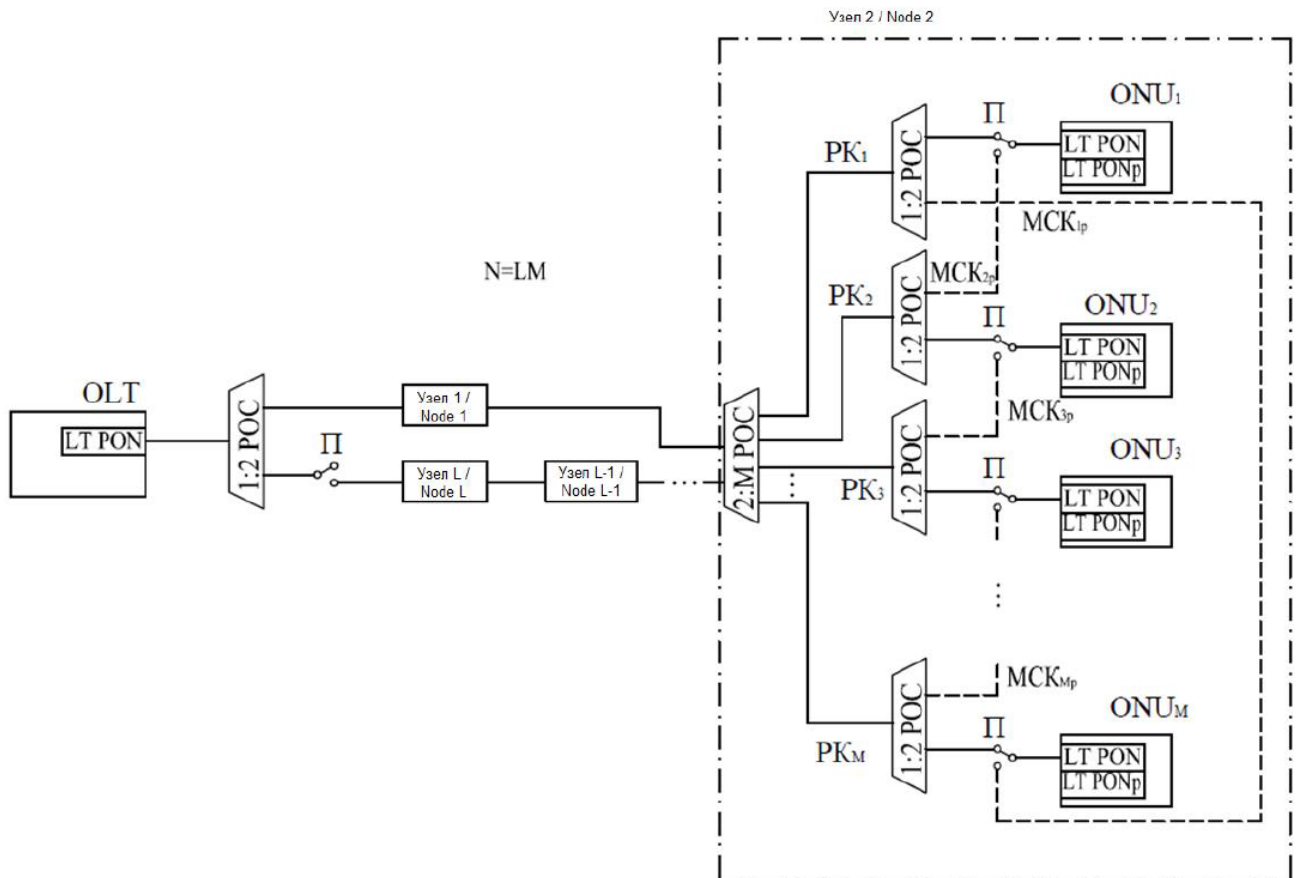


Рисунок 3.10 – Архітектура PON з гібридним захистом HR

Схема резервування N:1 на рівні OLT. Ця архітектура дає змогу резервувати один додатковий OLT для кожних N активних OLT. Шляхом оптимального розміщення вузлів Metro Core (MC) один до одного забезпечується захист для першого ступеня розгалуження. Якщо сума резервних OLT в MC-1 і MC-3 дорівнює числу активних OLT в MC-2, відмова при порушенні в роботі MC-2 може бути усунена. Завдяки цій схемі можна зробити повний захист абонентів MC-2 навіть за нестачі резервних OLT в MC-1 і MC-3. Цього можна

допомогтися шляхом переправлення одного з активних OLT MC-3 для резервування в MC-2, при цьому MC-4 може використовувати свій резервний OLT для обслуговування цього PON в MC-3. Таким чином, ми даємо змогу MC-4 ділитися своїм OLT у разі відмови, що сталася в MC-2, і в результаті ми можемо додатково зменшити кількість резервних OLT, доступних у системі [8].

4 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗЕРВУВАННЯ PON ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕРЕЖІ

4.1 Мережне відмовостійке сховище

Структурна діаграма надійності (Reliability block diagram, RBD) – це графічне представлення надійності системи, завдяки якому можна наочно уявити ефект використання всіляких конфігурацій функціонування і збоїв у роботі системи. Структурні діаграми надійності, які зображені на малюнках отримані для розглянутих мережевої архітектури доступу по оптичному волокну [9].

RBD незахищеної мережі PON зображено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – RBD незахищеної мережі PON

RBD PON із захистом згідно з рекомендаціями G.983.1, G.983.5 і G.989.1 представлені на рис. 4.2.

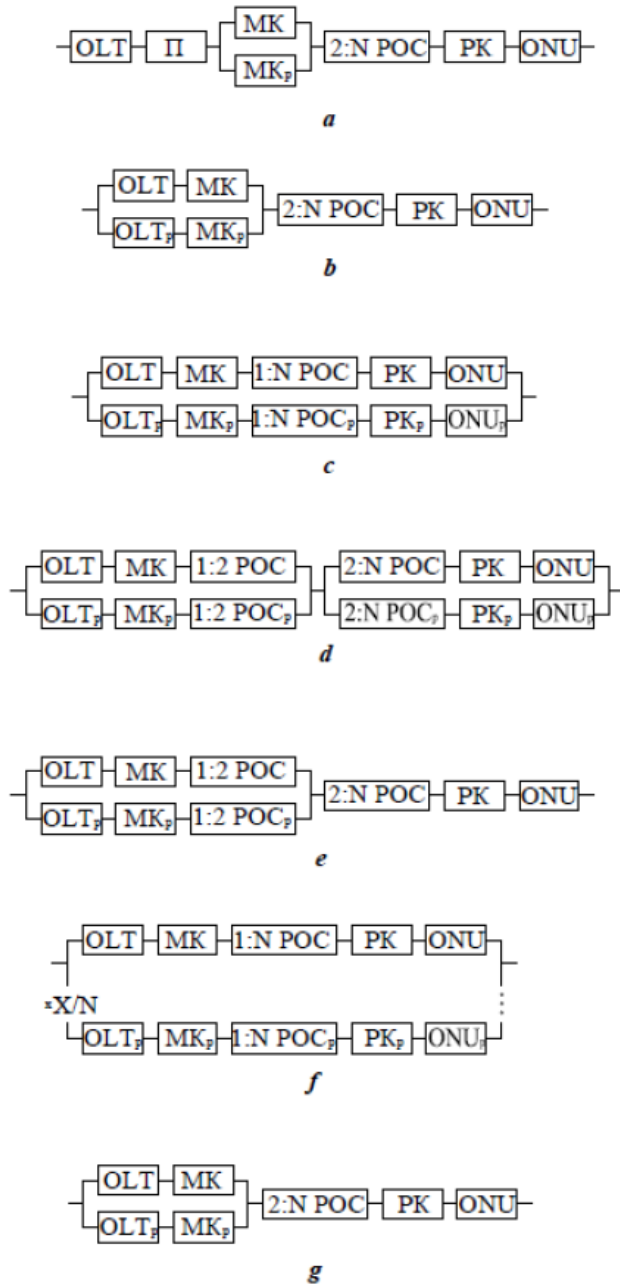


Рисунок 4.2 – RBD для схем із захистом типу А (а), В (b), С (c), D₁ (d), D₂ (e), а також схема резервування С типу X:N (f) і W(g)

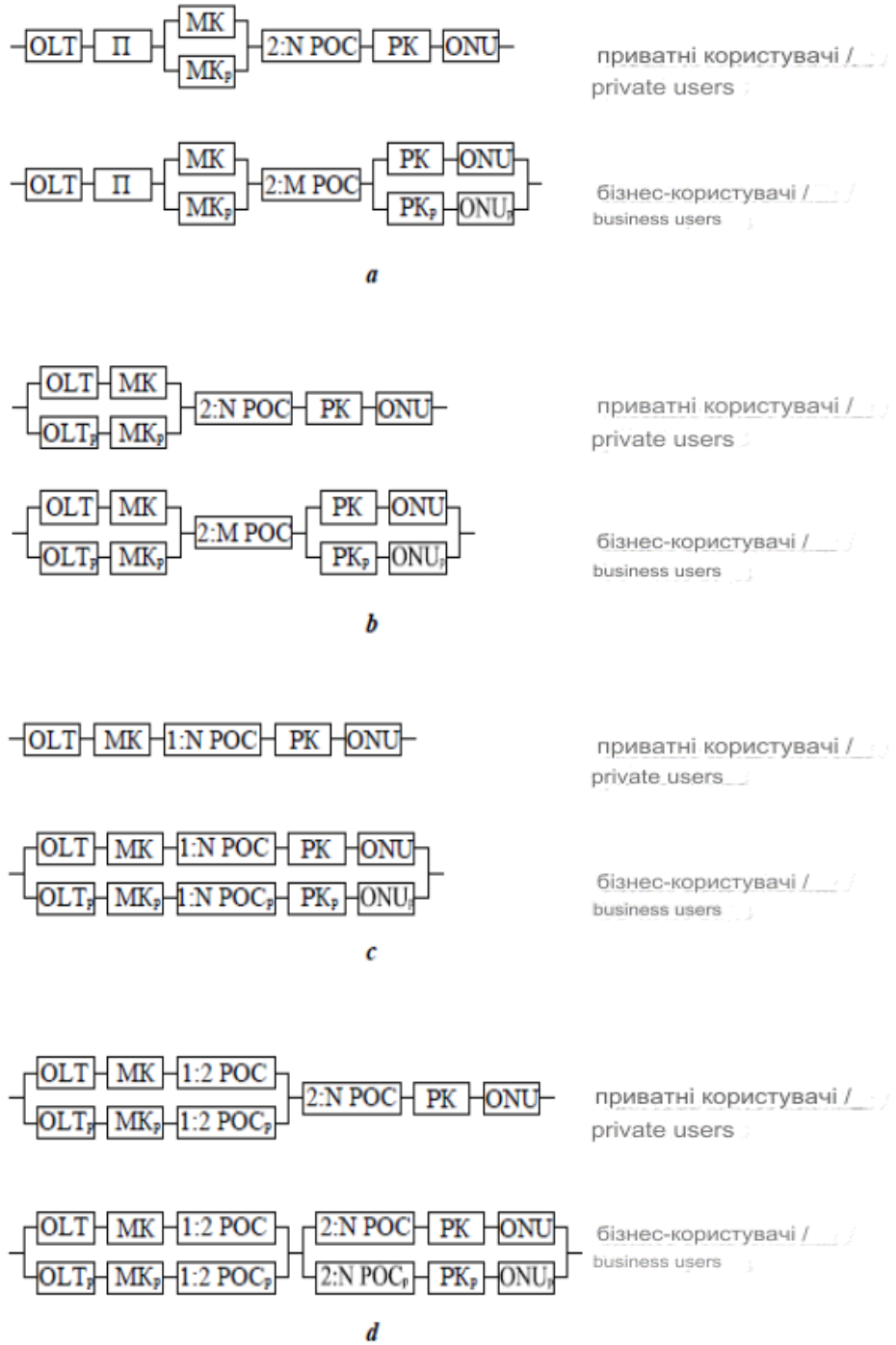


Рисунок 4.3 – RBD для модернізованих схем резервування G.983.1.
Захист типу А (a), В (b), С (c), D (d)

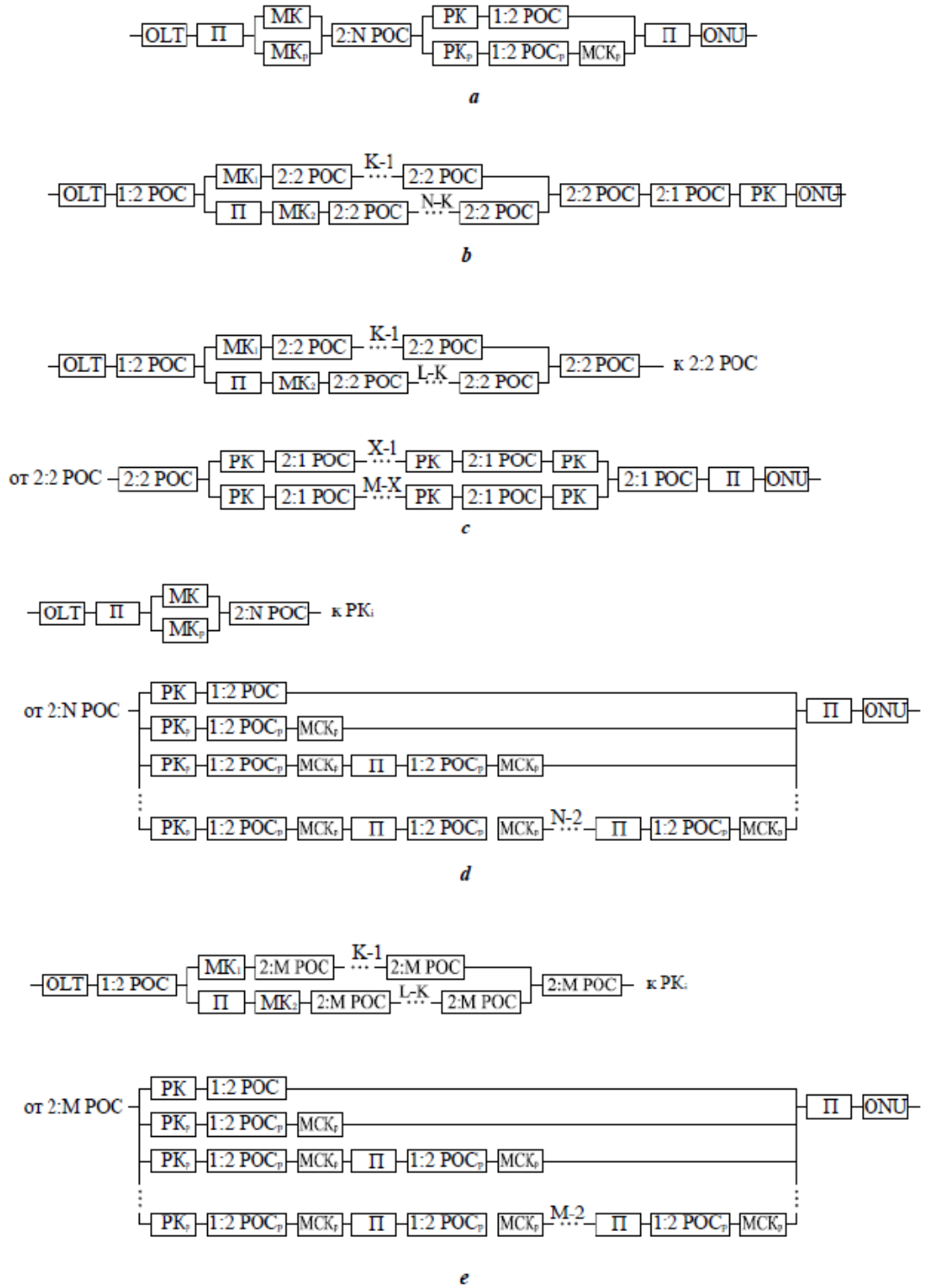


Рисунок 4.4 – RBD для схем: *a* – із «захистом сусіда»; *b* – із захистом на основі одного кільця; *c* – із захистом на основі подвійного кільця; *d* – із гібридним захистом на основі дерева; *e* – із гібридним захистом на основі кільця

4.2 Визначення коефіцієнтів неготовності схем резервування

Коефіцієнт неготовності мережі – один із найважливіших її показників, його визначення важливе для оцінювання капітальних та експлуатаційних витрат. Коефіцієнти неготовності для кожної схеми розраховують відповідно до її RBD [10].

Для більшості представлених схем коефіцієнт неготовності не залежить від загальної кількості користувачів у системі. Однак для схем із використанням кільцевої топології він залежить від кількості вузлів у кільці магістрального значення та кількості користувачів у розподільчому кільці [10].

Візьмемо чотири ситуації з точки зору протяжності та згрупованості користувачів.

Випадок 1. Щільне розташування користувачів у сільській місцевості з віддаленим СО: МК = 99 км; РК = 1 км; МСК = 0,5.

Випадок 2. Рідкісне розташування користувачів у сільській місцевості з віддаленим СО: МК = 80 км; РК = 20 км; МСК = 1.

Випадок 3. Рідкісне розташування користувачів у міській місцевості: МК = 20 км; РК = 5 км; МСК = 1.

Випадок 4. Щільне розташування користувачів у міській місцевості: МК = 24 км; РК = 1 км; МСК = 0,5.

Коефіцієнти неготовності кожного компонента взято відповідно до даних і подано в табл. 4.1[9].

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти неготовності компонентів

| Компонент | Коефіцієнт неготовності |
|-----------|-------------------------|
| OLT | $5,12 \cdot 10^{-7}$ |
| Волокно | $1,37 \cdot 10^{-5}$ |
| 1:N POC | $7,20 \cdot 10^{-7}$ |
| 1:2 POC | $3,00 \cdot 10^{-7}$ |
| ONU | $1,54 \cdot 10^{-6}$ |
| П | $1,20 \cdot 10^{-6}$ |

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти неготовності схем резервування

| Тип схеми | Коефіцієнт неготовності U при | | | |
|--|--|--|--|--|
| | МК = 99, РК = 1, МСК = 0,5 | МК = 80, РК = 20, МСК = 1 | МК = 20, РК = 5, МСК = 1 | МК = 24, РК = 1, МСК = 0,5 |
| Без резервування | $13,73 \cdot 10^{-4}$ | $13,73 \cdot 10^{-4}$ | $3,453 \cdot 10^{-4}$ | $3,453 \cdot 10^{-4}$ |
| Тип А (G.983.1) | $1,951 \cdot 10^{-5}$ | $2,792 \cdot 10^{-4}$ | $7,255 \cdot 10^{-5}$ | $1,778 \cdot 10^{-5}$ |
| Тип В (G.983.1) | $1,78 \cdot 10^{-5}$ | $2,775 \cdot 10^{-4}$ | $7,084 \cdot 10^{-5}$ | $1,607 \cdot 10^{-5}$ |
| Тип С (G.983.1) | $1,885 \cdot 10^{-6}$ | $1,885 \cdot 10^{-6}$ | $1,192 \cdot 10^{-7}$ | $1,192 \cdot 10^{-7}$ |
| Тип D ₁ (G.983.1) | $1,842 \cdot 10^{-6}$ | $1,279 \cdot 10^{-6}$ | $8,053 \cdot 10^{-8}$ | $1,089 \cdot 10^{-7}$ |
| Тип D ₂ (G.983.1) | $1,78 \cdot 10^{-5}$ | $2,775 \cdot 10^{-4}$ | $7,084 \cdot 10^{-5}$ | $1,607 \cdot 10^{-5}$ |
| Тип С (G.983.5) X:N при $\frac{X}{N} = \frac{1}{2}$ | $5,086 \cdot 10^{-5}$ | $5,086 \cdot 10^{-5}$ | $6,416 \cdot 10^{-6}$ | $6,416 \cdot 10^{-6}$ |
| Тип W (G.989.1) | $1,78 \cdot 10^{-5}$ | $2,775 \cdot 10^{-4}$ | $7,084 \cdot 10^{-5}$ | $1,607 \cdot 10^{-5}$ |
| Тип А (NG-PON2) | $1,951 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $4,272 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $2,792 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $3,709 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $7,255 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $2,512 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $1,778 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $2,54 \cdot 10^{-6}$ (Б) |
| Тип В (NG-PON2) | $1,78 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $2,561 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $2,775 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,998 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $7,084 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $8,002 \cdot 10^{-7}$ (Б) | $1,607 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $8,287 \cdot 10^{-7}$ (Б) |
| Тип С (NG-PON2) | $13,73 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,885 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $13,73 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,885 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $3,453 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,192 \cdot 10^{-7}$ (Б) | $3,453 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,192 \cdot 10^{-7}$ (Б) |
| Тип D (NG-PON2) | $1,78 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $1,842 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $2,775 \cdot 10^{-4}$ (Ч) $1,279 \cdot 10^{-6}$ (Б) | $7,084 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $8,053 \cdot 10^{-8}$ (Б) | $1,607 \cdot 10^{-5}$ (Ч) $1,089 \cdot 10^{-7}$ (Б) |
| NP | $7,012 \cdot 10^{-6}$ | $6,452 \cdot 10^{-6}$ | $5,253 \cdot 10^{-6}$ | $5,28 \cdot 10^{-6}$ |
| SR для 8 ONU | $1,711 \cdot 10^{-5}$ | $2,772 \cdot 10^{-4}$ | $7,147 \cdot 10^{-5}$ | $1,668 \cdot 10^{-5}$ |
| DR (для 8 ONU, 2 вузли по 4) | $4,861 \cdot 10^{-6}$ | $4,749 \cdot 10^{-6}$ | $4,471 \cdot 10^{-6}$ | $4,471 \cdot 10^{-6}$ |
| HT для 8 ONU | $4,861 \cdot 10^{-6}$ | $6,373 \cdot 10^{-6}$ | $5,247 \cdot 10^{-6}$ | $5,28 \cdot 10^{-6}$ |
| HR (для 8 ONU, 2 вузли по 4) | $4,261 \cdot 10^{-6}$ | $4,119 \cdot 10^{-6}$ | $3,869 \cdot 10^{-6}$ | $3,876 \cdot 10^{-6}$ |

Розглянуті схеми забезпечення надійності мережі відрізняються не тільки конструктивними елементами, а й якісними та кількісними характеристиками. Капітальні витрати безпосередньо залежать від кількості використовуваного обладнання та кабелю. Що більше дубльованих елементів у мережі, то дорожчим буде для оператора її розгортання. Експлуатаційні витрати також залежать від кількості обладнання, а саме, від споживаної електроенергії та займаних площ. Однак ці витрати більшою мірою залежать від відмовостійкості мережі: потрібно

буде не тільки придбати елемент, що відмовив, замінити його, а й виплатити штраф бізнес-користувачам за переривання трафіку. Порівняльну характеристику запропонованих схем наведено в табл. 4.3 [9].

Таблиця 4.3 – Характеристика схем забезпечення надійності мережі

| Варіанти реалізації | Характеристики | | | | | | | |
|------------------------------|--|------------------|---|---|----------------------|-----------|--------------------|------------------------|
| | Захищена ділянка | Тип резервування | Незахищена область | Область перемикавання | Швидке перемикавання | Гнучкість | Капітальні витрати | Експлуатаційні витрати |
| Тип А (G.983.1) | Магістральний кабель | 1:1 | Інтерфейси OLT і ONU, спліттер, розподільний кабель | Магістральний кабель | Ні | Погана | Низькі | Дуже високі |
| Тип В (G.983.1) | Інтерфейс OLT і магістральний кабель | 1:1 | Інтерфейс ONU, спліттер, розподільчий кабель | Інтерфейс OLT та магістральний кабель | Ні | Погана | Середні | Високі |
| Тип С (G.983.1) | Інтерфейси OLT і ONU, спліттер, магістральний і розподільний кабелі | 1+1 1:1 | - | Усі складові | Так | Хороша | Високі | Низькі |
| Тип D ₁ (G.983.1) | Інтерфейси OLT і ONU, обидва спліттери, незалежний захист магістрального і розподільного кабелів | 1:1 | - | Усі складові | Ні | Хороша | Дуже високі | Низькі |
| Тип D ₂ (G.983.1) | Інтерфейси OLT, ONU, спліттер 1:2, магістральний кабель | 1:1 | Інтерфейс ONU, спліттер 2:N, розподільний кабель | Інтерфейси OLT, ONU, спліттер 1:2, магістральний кабель | Ні | Погана | Високі | Низькі |
| Тип С (G.983.5) | Деякі або всі інтерфейси OLT і ONU, спліттер, магістральний кабель і деякі або всі розподільні кабелі | X:N | Деякі інтерфейси OLT і ONU, і деякі розподільні кабелі (або такої області немає) | Деякі або всі інтерфейси OLT і ONU, спліттер, магістральний кабель і деякі або всі розподільні кабелі | Ні | Хороша | Високі | Середні |
| Тип W (G.989.1) | Інтерфейс OLT і магістральний кабель | 2n:n | Інтерфейс ONU, спліттер, розподільний кабель | Інтерфейс ONU, спліттер, розподільний кабель | Ні | Погана | Середні | Низькі |
| Тип А (NG-PON2) | Магістральний кабель для всіх, інтерфейс ONU і розподільний кабель для бізнес-користувачів | 1:1 | Інтерфейс OLT і спліттер для всіх, розподільний кабель для приватних користувачів | Інтерфейс OLT і спліттер для всіх, розподільний кабель для приватних користувачів | Ні | Погана | Низькі | Низькі |
| Тип В (NG-PON2) | Інтерфейс OLT і магістральний кабель для всіх, інтерфейс ONU і розподільний кабель для бізнес-користувачів | 1:1 | Спліттер для всіх, інтерфейс ONU і розподільний кабель для приватних користувачів | Спліттер для всіх, інтерфейс ONU і розподільний кабель для приватних користувачів | Ні | Погана | Середні | Низькі |
| Тип С (NG-PON2) | Інтерфейс OLT, спліттер, магістральний всіх, інтерфейс ONU і розподільний кабель для бізнес-користувачів | 1+1 1:1 | Інтерфейс ONU і розподільний кабель для приватних користувачів | Інтерфейс ONU і розподільний кабель для приватних користувачів | Так | Хороша | Високі | Низькі |

Продовження таблиці 4.3.

| | | | | | | | | |
|-----------------|---|-----|--|---|-----|--------|-------------|---------|
| Тип D (NG-PON2) | Інтерфейс OLT, обидва спліттери, магістральний кабель для усіх, інтерфейс ONU і розподільний кабель для бізнес-користувачів | 1:1 | Інтерфейс ONU і розподільний кабель для приватних користувачів | Інтерфейс OLT, обидва спліттери, магістральний кабель для усіх, інтерфейс ONU і розподільний кабель для бізнес-користувачів | Ні | Хороша | Дуже високі | Низькі |
| NP | Магістральний і розподільний кабелі | 1:1 | Інтерфейси OLT і ONU, спліттер | Магістральний і розподільний кабелі | Ні | Погана | Низькі | Середні |
| SR | Магістральний кабель | 1:1 | Інтерфейси OLT і ONU, обидва спліттери, розподільний кабель | Магістральний кабель | Ні | Погана | Низькі | Середні |
| DR | Магістральний і розподільний кабелі, спліттер 2:1 | 1:1 | Інтерфейси OLT і ONU, обидва спліттера 2:2 | Магістральний і розподільний кабелі, спліттер 2:1 | Ні | Погана | Середні | Середні |
| N:1 | Деякі інтерфейси OLT спліттер, магістральний кабель, магістральний кабель | 1:1 | Деякі інтерфейси OLT, інтерфейс ONU, розподільний кабель | Деякі інтерфейси OLT, спліттер, магістральний кабель | Так | Хороша | Середні | Низькі |
| HT | Магістральний і розподільний кабелі | 1:1 | Інтерфейси OLT і ONU, спліттер | Магістральний і розподільний кабелі | Ні | Погана | Середні | Середні |
| HR | Магістральний і розподільний кабелі | 1:1 | Інтерфейси OLT і ONU, обидва спліттера 2:2 і спліттер 2:1 | Магістральний і розподільний кабелі | Ні | Погана | Середні | Середні |

ВИСНОВКИ

В рамках даної кваліфікаційної роботи були проведені дослідження особливостей побудови та забезпечення надійності функціонування оптичних мереж доступу на базі технології PON.

У першому розділі було розглянуто основні принципи роботи, характеристики і види PON. Одною з особливостей є використання пасивних оптичних компонентів, які не потребують живлення, що дозволяє знизити витрати на обслуговування та підвищити надійність мережі.

Другий розділ присвячений принципу побудові технології пасивних оптичних мереж. Розглянуті схеми організації мережі зв'язку, будова та проектування розподільчої мережі. Основними компонентами PON є оптичний лінійний термінал, оптичний мережевий термінал та оптичний роздільник.

Також у другому розділі було визначено, як саме правильно обрати компоненти для оптичної мережі PON, та зробити вірні розрахунки загасання в мережі. Приведені основні аспекти побудови топології мережі, їх різновиди та типи.

Третій розділ включає в себе дослідження методів підвищення відмовостійкості у мережах PON шляхом застосування схем резервування. Підвищення відмовостійкості є критично важливим аспектом побудови надійних оптичних мереж. Основними методами є резервування обладнання, шляхів передачі даних та впровадження протоколів відновлення.

Використання резервних OLT та ONU, а також кільцевих топологій з протоколами відновлення, дозволяє значно знизити час простою мережі та забезпечити безперервну роботу.

У четвертому розділі виконано аналіз характеристик резервування PON для підвищення надійності мережі. Аналіз показав, що застосування методів резервування дозволяє підвищити надійність мережі, знижуючи вплив відмов обладнання або обривів кабелю на кінцевих користувачів. Резервування на

рівні фізичного з'єднання та використання активних методів моніторингу дозволяють швидко виявляти та усувати несправності, що забезпечує високу надійність та стабільність мережі.

В результаті дослідження можна стверджувати, що правильне проектування та впровадження оптичних мереж доступу з використанням технологій PON забезпечує високу швидкість передачі даних, економічну ефективність та надійність. Дотримання рекомендацій щодо резервування та моніторингу мережі є ключовими факторами для забезпечення безперебійної роботи та задоволення потреб користувачів у якісному зв'язку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Passive Optical Networks: An Understanding [Електронний документ] - Режим доступу: <https://www.123.net/blog/passive-optical-networks-an-understanding/>
2. Key Technologies for a Beyond-100G Next-Generation Passive Optical Network [Електронний документ] - Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2304-6732/10/10/1128>
3. Побудова волоконно-оптичних систем доступу [Електронний документ] - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/372495876_optimalni_tehnologii_pobudovi_volokonno-opticnih_sistem_dostupu
4. Використання FTTH-технології для побудови ОМД [Електронний документ] - Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/17551/2983.pdf?sequence=3>
5. Протокол управління багатоточковим обміном [Електронний документ] - Режим доступу: <https://studfile.net/preview/2923836/page:3/>
6. Пасивні оптичні мережі PON Петренко І.І. [Електронний документ] - Режим доступу: <https://www.rus.dynamix.ua/2007/press/pon.htm>
7. Оптичний бюджет GPON на базі обладнання Eltex [Електронний документ] - Режим доступу: <https://eltexsl.ru/resheniya/optical-power-budget/>
8. Сімейство технологій PON та проблеми резервування, Меккель А.М., [69 – 74 стр.]
9. Анализ методов обеспечения показателей надежности сетей PON и LR-PON. Часть I, Е.П. Юникова, В.П. Шувалов [3-18 стр.]
10. Kazovsky L.G., Shaw W.-T., Gutierrez D., Cheng N., and Wong S.-W. Next-Generation Optical Access Networks // Journal Of Lightwave Technology. - Vol. 25.- No. 11, November 2007, pp. 3428-3442.

11. Race for NGPON 2 heats up, Stephen Wilson/Informations Telecoms and Media, February 23, 2012, [Электронный документ] - Режим доступа: <http://www.telecomasia.net>
12. Boonchuan Ng, M. Syuhaimi Ab-Rahman. K. Jumari. Graphical User Interface for PON Network Management System // Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) Malaysia. InTech. May 2010, pp. 81-105.
13. Попович Ж. Следующее поколение пассивных оптических сетей // АО Эрикссон Никола Тесла, г. Загреб, Хорватия, Revija BR.1, 2010. - с. II/22-II/40.
14. Cheng X., Wen Y.J., Xu Z., Wang Y, Yeo Y.-K. Survivable WDM-PON with self-protection and in-service fault localization capabilities // Optics Communications. - Vol. 281. - No. 18, June 2008, pp. 4606-4611.
15. Malhotra R., ManindarPal Dr. Performance analysis in Passive Optical Networks (PONs) // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. - Vol. 1, Issue 4, June 2012, pp. 263-267. ISSN: 2278-1021.