

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Навчальна дисципліна:

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 4

Системи передавання мереж доступу

Доцент кафедри Комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій,
кандидат технічних наук

Педяш Володимир Віталійович

2025 рік

Зміст

Вступ.....	3
Лекція 1. Загальна характеристика систем передачі широкосмугового доступу	4
Лекція 2. Системи та технології передачі мереж ШД на основі телефонної мережі загального користування	8
Лекція 3. Системи та технології передачі ШД на основі волоконно-оптичних кабелів	14
Лекція 4. Системи та технології передачі мереж безпроводового доступу ...	21
Лекція 5. Обладнання мереж доступу	24
Лекція 6. Проектування транспортних мереж та мереж доступу	29
Список рекомендованої літератури.....	36

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Телекомунікаційні системи та мережі» є однією з профільних дисциплін підготовки фахівців за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» і спрямована на формування у студентів системних знань про принципи побудови, функціонування та розвитку сучасних телекомунікаційних систем і мереж різного призначення.

Стрімкий розвиток інфраструктури зв'язку в Україні та світі, впровадження мереж п'ятого покоління 5G, масштабування хмарних обчислень і Інтернету речей висувають принципово нові вимоги до рівня теоретичної підготовки та практичних навичок майбутніх інженерів-телекомунікаційників. Фахівець галузі зобов'язаний вільно орієнтуватися в архітектурі мереж передавання даних, методах мультиплексування та принципах побудови цифрових систем передавання, що є базисом для засвоєння спеціальних дисциплін наступних курсів.

Лекція 1. Загальна характеристика систем передачі широкосмугового доступу

1.1. Класифікація систем та технологій передачі мереж широкосмугового доступу

Широкосмуговий доступ (ШД) є фундаментальною складовою сучасних телекомунікаційних інфраструктур, що забезпечує користувачам передачу даних із високою швидкістю та якістю обслуговування. Під терміном «широкосмуговий доступ» розуміють сукупність технологій і систем, що дозволяють організувати мережевий доступ із швидкостями, які суттєво перевищують можливості традиційного вузькосмугового з'єднання.

Класифікація систем широкосмугового доступу здійснюється за кількома ключовими ознаками: за типом фізичного середовища передавання, за архітектурою побудови мережі, за способом організації доступу до смуги частот, а також за технологічними стандартами. За типом середовища виділяють дротові (провідні) та безпроводові системи, кожна з яких має власні підкласи і технічні особливості.

До провідних систем відносять технології на основі мідного кабелю (xDSL), коаксіального кабелю (HFC), а також волоконно-оптичні системи (FTTx, PON, AON). Безпроводові системи широкосмугового доступу охоплюють радіотехнології стандартів IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX), LTE/5G, а також атмосферні оптичні системи FSO (Free Space Optical). Кожна з цих технологій має власний діапазон застосування, що визначається технічними характеристиками та економічними показниками.

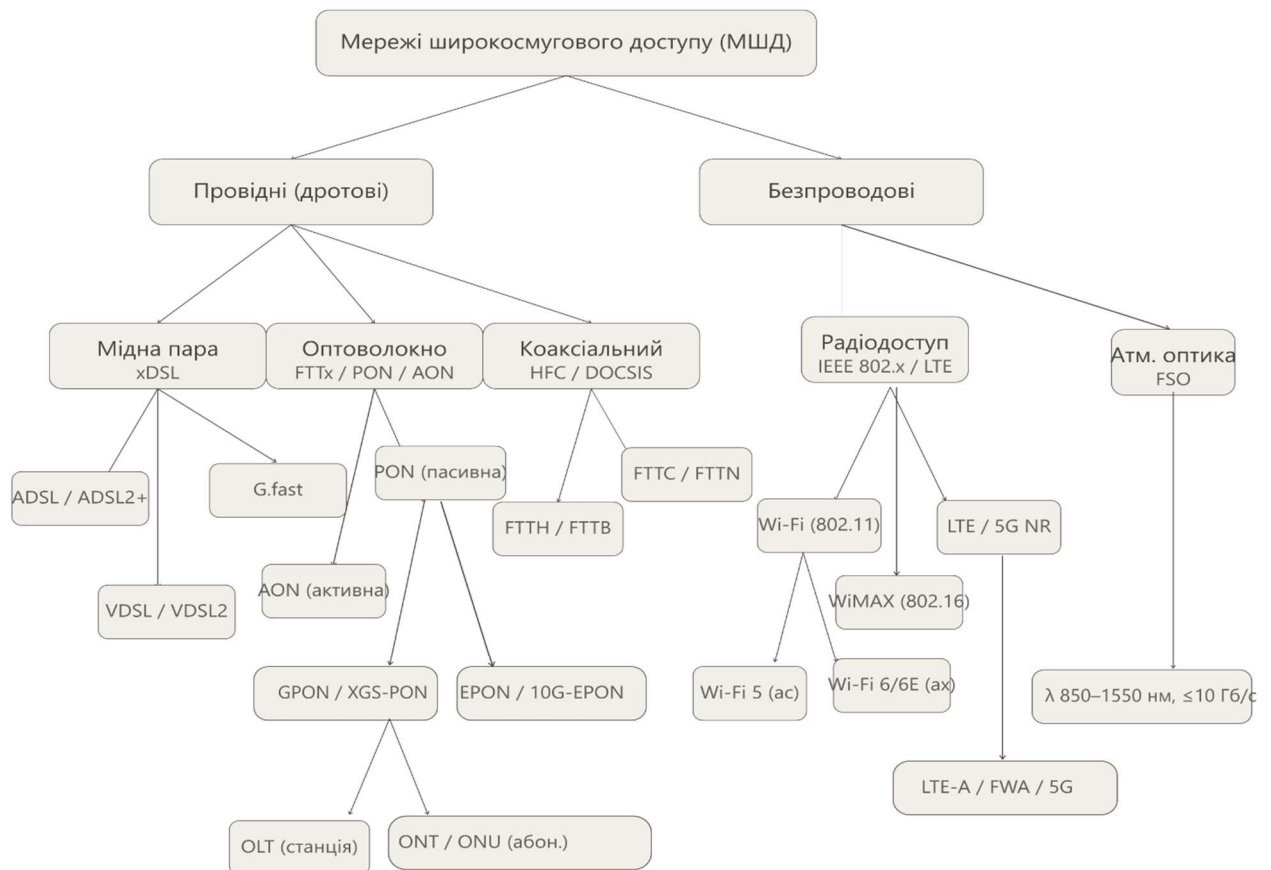


Рисунок 1.1 – Класифікація систем та технологій мереж широкосмугового доступу

Архітектурна класифікація систем ШД передбачає поділ на централізовані, розподілені та гібридні рішення. Централізована архітектура характеризується зосередженням активного обладнання у вузлі оператора з пасивним розподільчим середовищем до абонента. Розподілена архітектура передбачає розміщення активних елементів ближче до абонентів, що дозволяє скоротити довжину кінцевого абонентського відрізка та підвищити реалізовані швидкості передавання.

1.2. Рекомендації МСЕ-Т відносно побудови систем доступу

Міжнародний союз електрозв'язку — сектор стандартизації телекомунікацій (МСЕ-Т) розробив комплекс рекомендацій, що визначають

архітектурні принципи, технічні вимоги та порядок взаємодії елементів у системах доступу. Ці рекомендації формують нормативну базу для проектування, розгортання та експлуатації мереж ШД на глобальному рівні і є обов'язковими для врахування при проектуванні нових мереж та модернізації існуючих.

Рекомендація MCE-T G.902 «Framework Recommendation on Functional Requirements for Access Networks» визначає загальну концепцію побудови мереж доступу, включаючи еталонні конфігурації та функціональні інтерфейси між елементами мережі. Відповідно до цього документа мережа доступу розглядається як сукупність засобів транспортування інформації між точкою підключення абонента (ANI — Access Network Interface) та точкою з'єднання з мережею загального користування (SNI — Service Node Interface).

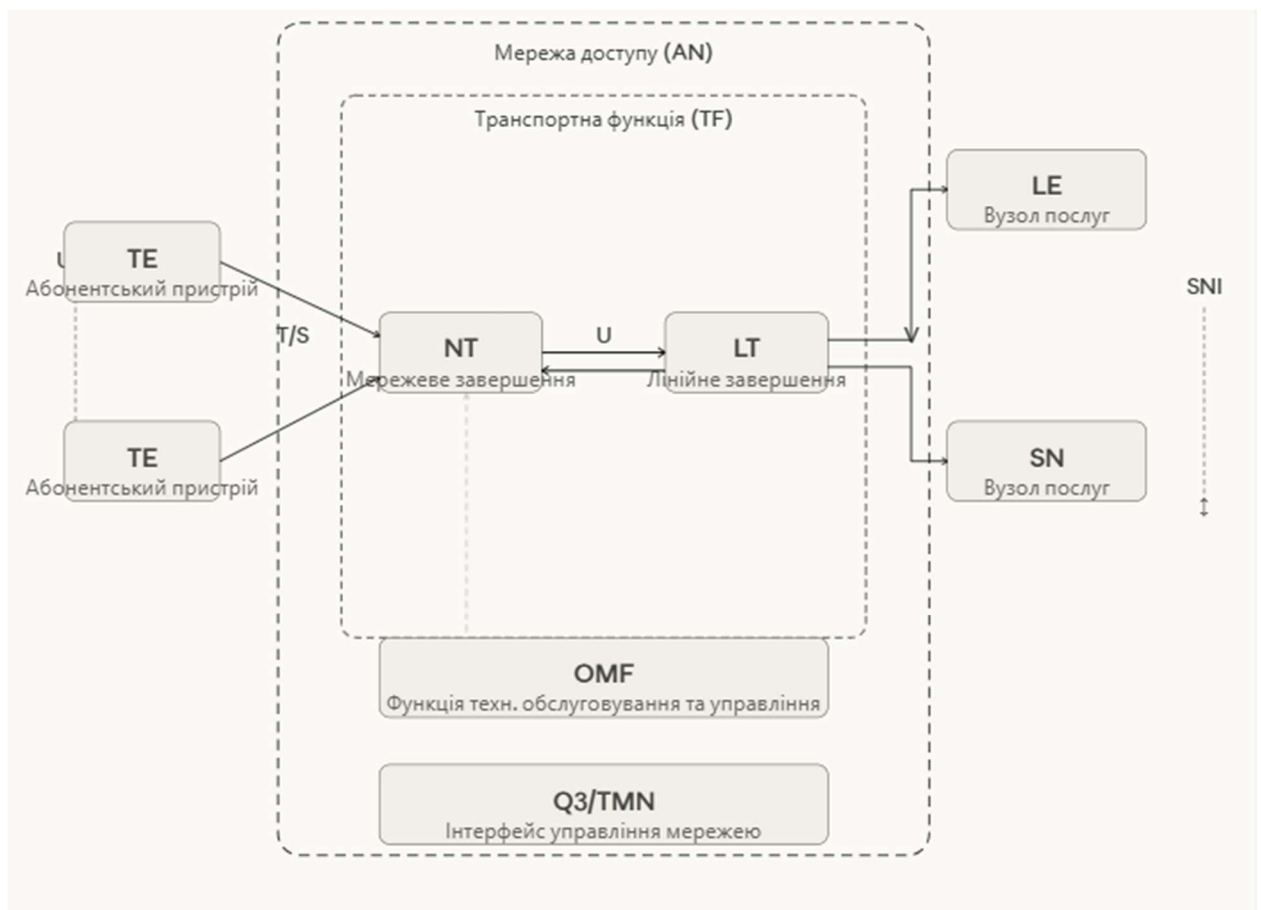


Рисунок 1.2 – Еталонна конфігурація мережі доступу за рекомендацією MCE-T G.902

Серія рекомендацій G.99x визначає вимоги до цифрових абонентських ліній (DSL), тоді як рекомендації серії G.98x присвячені оптичним системам доступу (PON). Рекомендації серії J визначають стандарти для кабельних телевізійних мереж (HFC), а рекомендації серії H — для мультимедійних застосувань. Сукупне застосування цих нормативних документів забезпечує сумісність обладнання від різних виробників та гарантований рівень якості послуг для кінцевих користувачів.

Ключовою вимогою MCE-T до систем доступу є підтримка концепції QoS (Quality of Service) з диференціацією потоків за пріоритетністю обслуговування. Це особливо важливо в умовах конвергентних мереж, де одне фізичне середовище використовується для надання послуг голосового зв'язку, передачі даних і відео одночасно (технологія Triple Play або Quad Play із додаванням мобільних послуг).

Лекція 2. Системи та технології передачі мереж ШД на основі телефонної мережі загального користування

2.1. Класифікація систем передачі мереж ШД за технологіями xDSL

Технології xDSL (Digital Subscriber Line — цифрова абонентська лінія) являють собою родину технологій високошвидкісної передачі даних по існуючій мідній абонентській парі телефонної мережі загального користування. Спільною рисою всіх xDSL-технологій є використання смуги частот, що виходить за межі стандартного телефонного каналу (0,3–3,4 кГц), тим самим забезпечуючи паралельну роботу голосового зв'язку та широкосмужової передачі даних без взаємних завад.

Класифікацію xDSL-технологій здійснюють за такими критеріями: симетричність каналу (симетричні та асиметричні), максимальна швидкість передавання, дальність дії по мідній парі, кількість задіяних пар та технологія лінійного кодування. До основних представників родини xDSL відносяться ADSL, ADSL2, ADSL2+, VDSL, VDSL2 та G.fast, кожна з яких займає власну нішу в загальній еволюції технологій абонентського доступу.

Технологія SDSL (Symmetric DSL) забезпечує симетричні швидкості передавання і використовується переважно для потреб корпоративних абонентів. HDSL та HDSL2 призначені для організації потоків E1/T1 по мідним парам без традиційних підсилювачів. SHDSL (Single-pair HDSL) є вдосконаленою симетричною технологією, що підтримує стандартизовані швидкості до 5,7 Мбіт/с на одну пару або до 11,4 Мбіт/с при використанні двох пар.

2.2. Узагальнена структурна схема цифрової абонентської лінії

Структурна схема цифрової абонентської лінії включає два основних напівкомплекти: абонентський (ATU-R — ADSL Transceiver Unit Remote) та станційний (ATU-C — ADSL Transceiver Unit Central). Між ними розміщується фізичне середовище передавання — мідна абонентська пара довжиною від кількох сотень метрів до 5–6 кілометрів, що є основним фактором, який обмежує досяжні швидкості передавання.

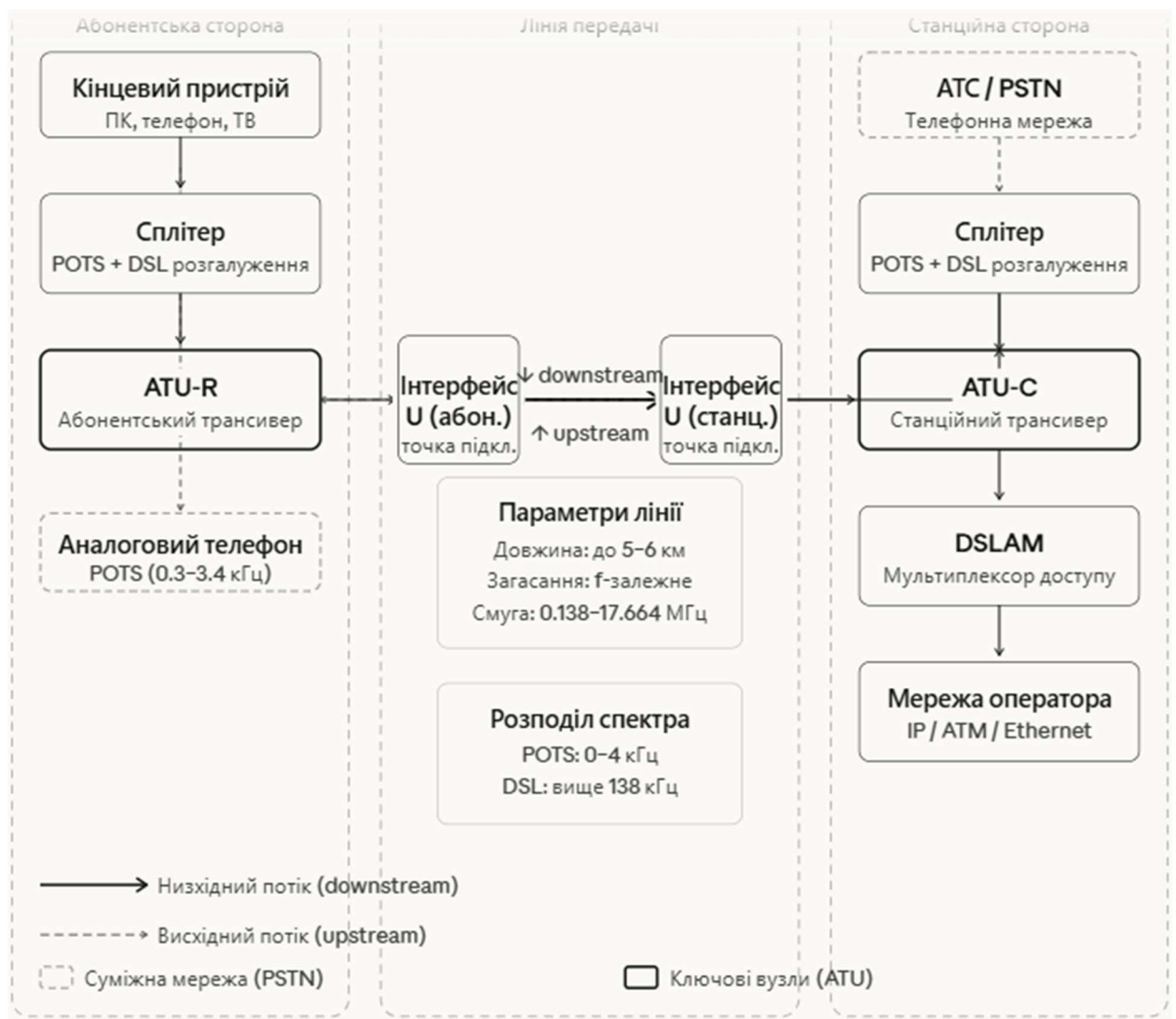


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема цифрової абонентської лінії xDSL

На стороні центрального офісу розміщується DSLAM (DSL Access Multiplexer) — пристрій агрегації абонентських ліній. DSLAM здійснює мультиплексування трафіку від множини абонентських пар і передає його

через широкосмуговий вивід до мережі оператора. Сучасні DSLAM підтримують одночасно декілька стандартів xDSL, що дозволяє оператору гнучко керувати набором послуг для кожного абонента.

Важливим елементом схеми є сплітер (POTS Splitter), що забезпечує частотне розподілення голосового сигналу та сигналу DSL. Завдяки цьому пристрою стає можливим одночасне використання однієї абонентської пари для аналогового телефону та широкосмугового доступу без взаємних завад. Сплітер є пасивним фільтруючим пристроєм, що не потребує живлення і не вносить додаткових затримок у тракт передавання.

2.3. Алгоритми функціонування цифрових абонентських ліній

Функціонування цифрових абонентських ліній базується на процедурах ініціалізації (training), стабілізації та адаптивної зміни параметрів з'єднання. Процедура ініціалізації (handshake) дозволяє двом транссиверам визначити оптимальні параметри з'єднання: розподіл бітів за піднесучими, потужності сигналів, вибір алгоритму кодування та корекції помилок у відповідності до реальних умов у лінії.

Технологія адаптивного розподілу бітів (Adaptive Bit Loading, ABL) є ключовим алгоритмом у системах xDSL з мультитональною модуляцією DMT (Discrete Multitone). Відповідно до виміряного відношення сигнал/завада (SNR) на кожній піднесучій алгоритм призначає оптимальну кількість бітів від 0 до 15, максимізуючи загальну пропускну здатність при дотриманні заданого значення коефіцієнта бітових помилок (BER).

Механізм адаптивної швидкісної зміни (Seamless Rate Adaptation, SRA) дозволяє динамічно змінювати швидкість передавання без розриву з'єднання у відповідь на зміни умов у лінії. При погіршенні характеристик лінії через завади від кристалків або зовнішніх джерел швидкість знижується до

безпечного рівня, а при покращенні умов — підвищується до максимально можливого значення, гарантуючи безперервність надання послуг.

2.4. Технології ADSL, VDSL та G.fast

Технологія ADSL (Asymmetric DSL) стала першою масовою технологією широкосмугового абонентського доступу. Стандарт ITU-T G.992.1 (ADSL) визначає асиметричну передачу: до 8 Мбіт/с у низхідному напрямку (downstream) та до 896 кбіт/с у висхідному (upstream) на відстанях до 5 км. ADSL2 (G.992.3) розширює швидкості до 12/3,5 Мбіт/с відповідно, а ADSL2+ (G.992.5) — до 24/1,4 Мбіт/с за рахунок розширення спектра до 2,2 МГц.

Технологія VDSL (Very high-speed DSL) за стандартом ITU-T G.993.1 забезпечує швидкості до 52 Мбіт/с у низхідному напрямку при довжині лінії не більше 300 м. VDSL2 (G.993.2) із профілем 17a досягає 100 Мбіт/с, а профіль 35b — понад 300 Мбіт/с при довжинах лінії до 100–200 м. Для досягнення максимальних швидкостей VDSL2 активне обладнання вноситься у вуличні вузли розподілу, що мінімізують довжину мідної пари до абонента.

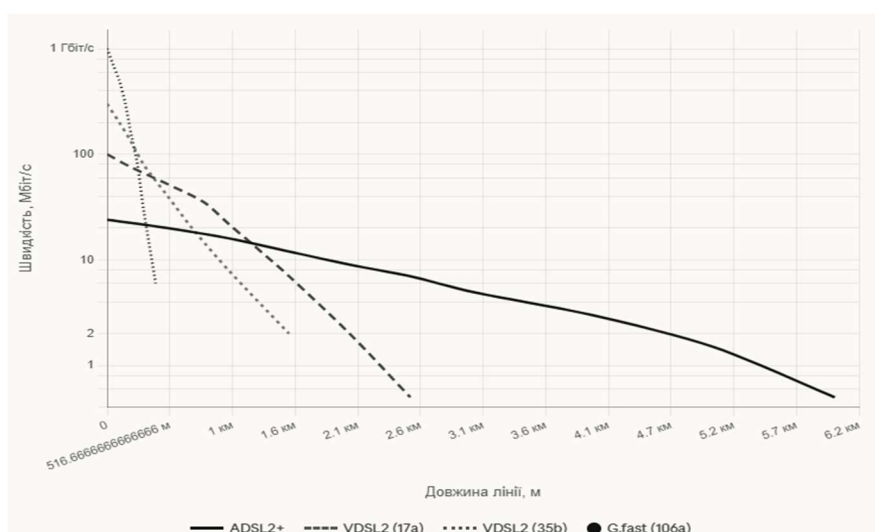


Рисунок 2.2 – Залежність швидкості передавання від довжини лінії для xDSL-технологій

Стандарт G.fast (ITU-T G.9701) є наступним кроком еволюції xDSL і орієнтований на ультракороткі лінії завдовжки до 100–250 м. Використовуючи смугу частот до 106 МГц (профіль 106a) або 212 МГц (профіль 212a), G.fast забезпечує симетричні швидкості до 1 Гбіт/с на відстанях менше 100 м. Технологія базується на DMT-модуляції з кількістю піднесучих до 4096 та підтримує векторинг для усунення перехресних завад між лініями в кабельному пучку.

2.5. Маски спектрів, параметри лінійних сигналів

Маски спектрів потужності (Power Spectral Density Masks, PSD Masks) є нормативним інструментом регулювання електромагнітної сумісності між системами xDSL та між xDSL і традиційними телефонними системами. МСЕ-Т у своїх рекомендаціях визначає граничні рівні потужності сигналу для кожної технології xDSL на кожній піднесучій, що є обов'язковими для виконання виробниками обладнання та операторами зв'язку.

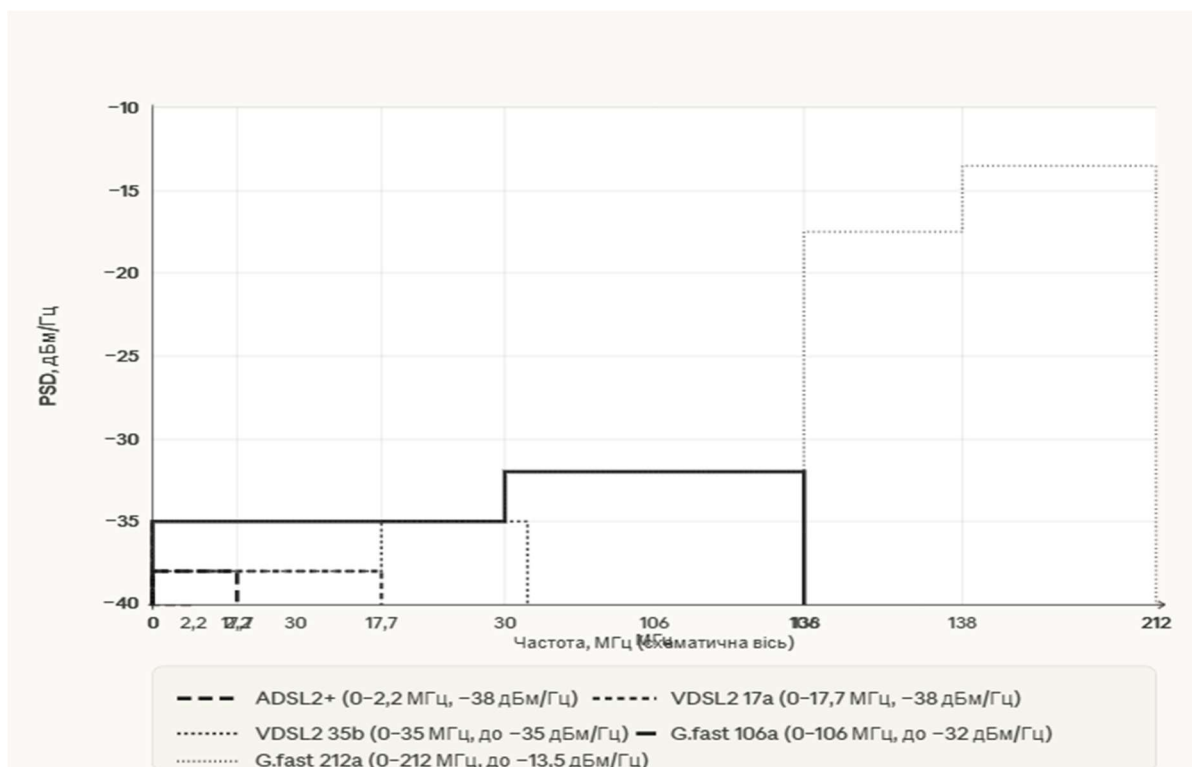


Рисунок 2.3 – Маски спектрів потужності для технологій ADSL2+, VDSL2 та G.fast

Ключовими параметрами лінійних сигналів xDSL є: максимальна сумарна потужність передавання (як правило, не більше 20 дБм), максимальний рівень потужності на одну піднесучу (PSD), перехідне загасання між парами (NEXT/FEXT), загасання сигналу в лінії, а також рівень завад від радіомовлення та інших зовнішніх джерел. Для забезпечення завадостійкості вимагається мінімальний запас по шуму (SNR Margin) не менше 6 дБ.

Лекція 3. Системи та технології передачі ШД на основі волоконно-оптичних кабелів

3.1. Системи та технології передачі оптичних мереж доступу

Оптичні мережі доступу (ОМД) є найбільш перспективним напрямком розвитку широкосмугового доступу, оскільки забезпечують принципово вищу пропускну здатність, більшу дальність передавання та кращу завадостійкість порівняно з мідними технологіями. В основі ОМД лежить використання одномодового волоконно-оптичного кабелю (SMF — Single Mode Fiber) як середовища передавання оптичних сигналів на довжинах хвиль 1310, 1490 та 1550 нм.

Основними технологіями передавання в оптичних мережах доступу є: технологія безпосередньої інтенсивності з прямим детектуванням (IM/DD — Intensity Modulation/Direct Detection) для пасивних оптичних мереж, технологія спектрального розподілу хвиль (WDM — Wavelength Division Multiplexing) для нарощування пропускну здатності без прокладання додаткових волокон, а також технологія множинного доступу з часовим розподілом (TDMA) для організації зворотного каналу у PON-системах.

3.2. Принципи побудови та архітектура ОМД за концепціями FTTx

Концепція FTTx (Fiber To The x) описує варіанти архітектурного розміщення точки завершення оптичного волокна відносно абонента. Буква «х» визначає місце, до якого підведено оптику: FTTH (Fiber To The Home) — безпосередньо до помешкання абонента, FTTB (Fiber To The Building) — до будівлі з подальшим розподілом по мідних кабелях усередині, FTTC (Fiber To The Curb) — до вуличного розподільчого вузла на відстані до 300 м від абонента, FTTN (Fiber To The Node) — до телефонного шафи або вузла мікрорайону на відстані до 1,5 км.

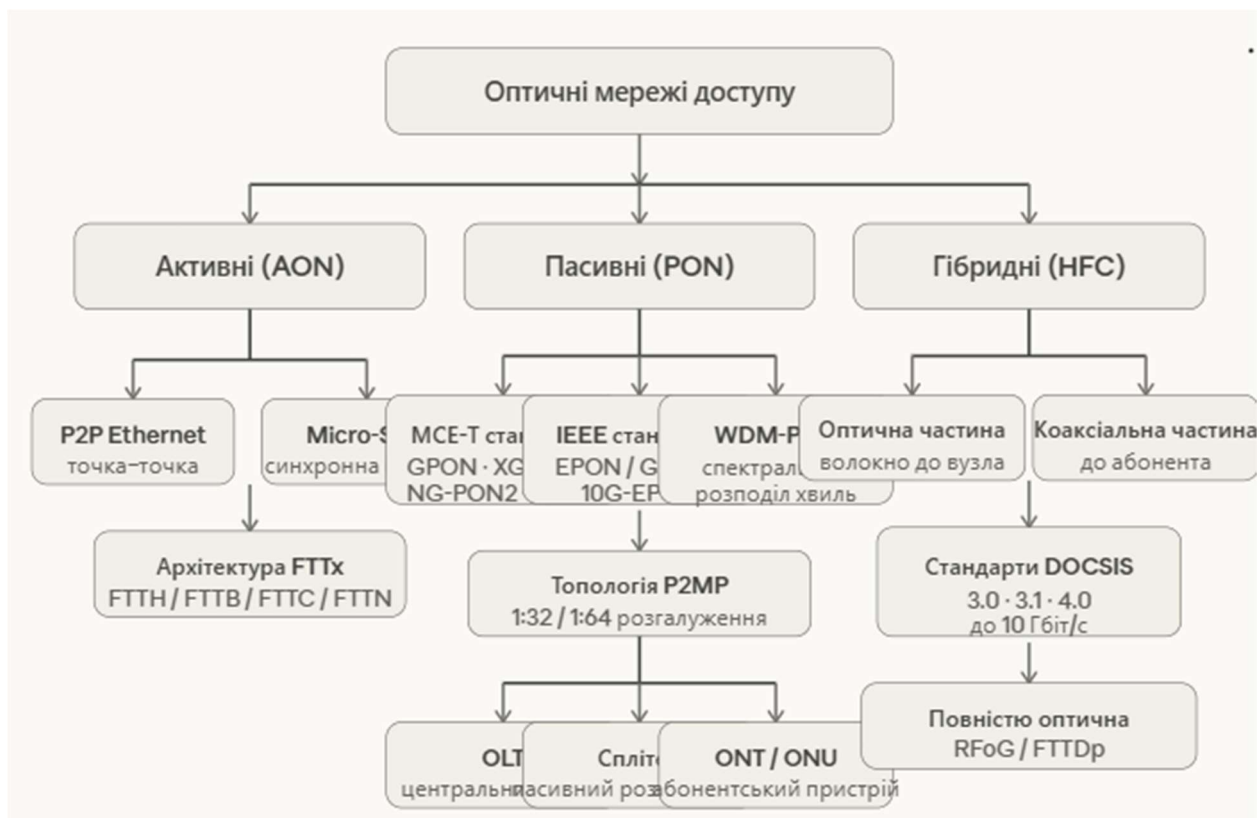


Рисунок 3.1 – Класифікація оптичних мереж доступу

Порівняльні характеристики				
Показник	FTTN	FTTC	FTTB	FTTH
Оптика до	Вузла р-ну	Вуличн. шафи	Будівлі	Квартири / будинку
Мідна пара	до 1500 м	до 300 м	до 100 м	відсутня
Типова швидкість	до 100 Мбіт/с	до 300 Мбіт/с	до 1 Гбіт/с	1-10 Гбіт/с
Вартість CAPEX	низька	середня	середня	висока
Масштабування	обмежене	помірне	добре	відмінне
Технологія	VDSL2	VDSL2 / G.fast	GPON / Ethernet	GPON / XGS-PON
Застосування	Передмістя	Вулиці міста	Багатоквартирні	Нова забудова
Абон. обладнання	DSL-модем	DSL-модем	ONU	ONT

Рисунок 3.2 – Порівняльні характеристики варіантів FTTx

Вибір варіанту FTTx визначається балансом між вартістю будівництва мережі та досяжною пропускнуою здатністю для кінцевого абонента. FTTH

забезпечує максимальні швидкості та найвищу якість обслуговування, але потребує значних капітальних інвестицій. FTTB та FTTC дозволяють суттєво скоротити витрати на будівництво шляхом використання наявних мідних кабелів у кінцевій ділянці лінії, обмежуючи при цьому максимальні досяжні швидкості доступу.

3.3. Мережі Micro-SDH, активні (AON) та пасивні (PON) ОМД

Активні оптичні мережі (AON — Active Optical Networks) будуються на основі активного комутуючого або маршрутизуючого обладнання у вузлах розподілення. Стандартна архітектура AON передбачає з'єднання «точка-точка» (P2P — Point-to-Point) між центральним вузлом оператора та кожним абонентом через виділені оптичні волокна або активні комутатори. Це забезпечує гарантовану пропускну здатність та просту діагностику, однак потребує більшої кількості оптичних волокон і активного обладнання в полі.

Мережі Micro-SDH є різновидом AON і базуються на мультиплексуванні цифрових потоків за ієрархією SDH (Synchronous Digital Hierarchy). Вони дозволяють гнучко організовувати вузькосмугові та широкосмугові послуги з гарантованими тимчасовими показниками якості, що особливо важливо для підключення корпоративних клієнтів та операторського обладнання різних видів.

Пасивні оптичні мережі (PON — Passive Optical Networks) є основним напрямком сучасних розгортань FTTN завдяки оптимальному співвідношенню вартості та продуктивності. Архітектура PON базується на топології «точка-кілька точок» (P2MP — Point-to-Multipoint) з використанням пасивних оптичних розгалужувачів (сплітерів) для розподілення оптичного сигналу між абонентами. Типовий коефіцієнт розгалуження становить 1:32 або 1:64, тобто одне оптичне волокно від центрального вузла обслуговує відповідно 32 або 64 абоненти.

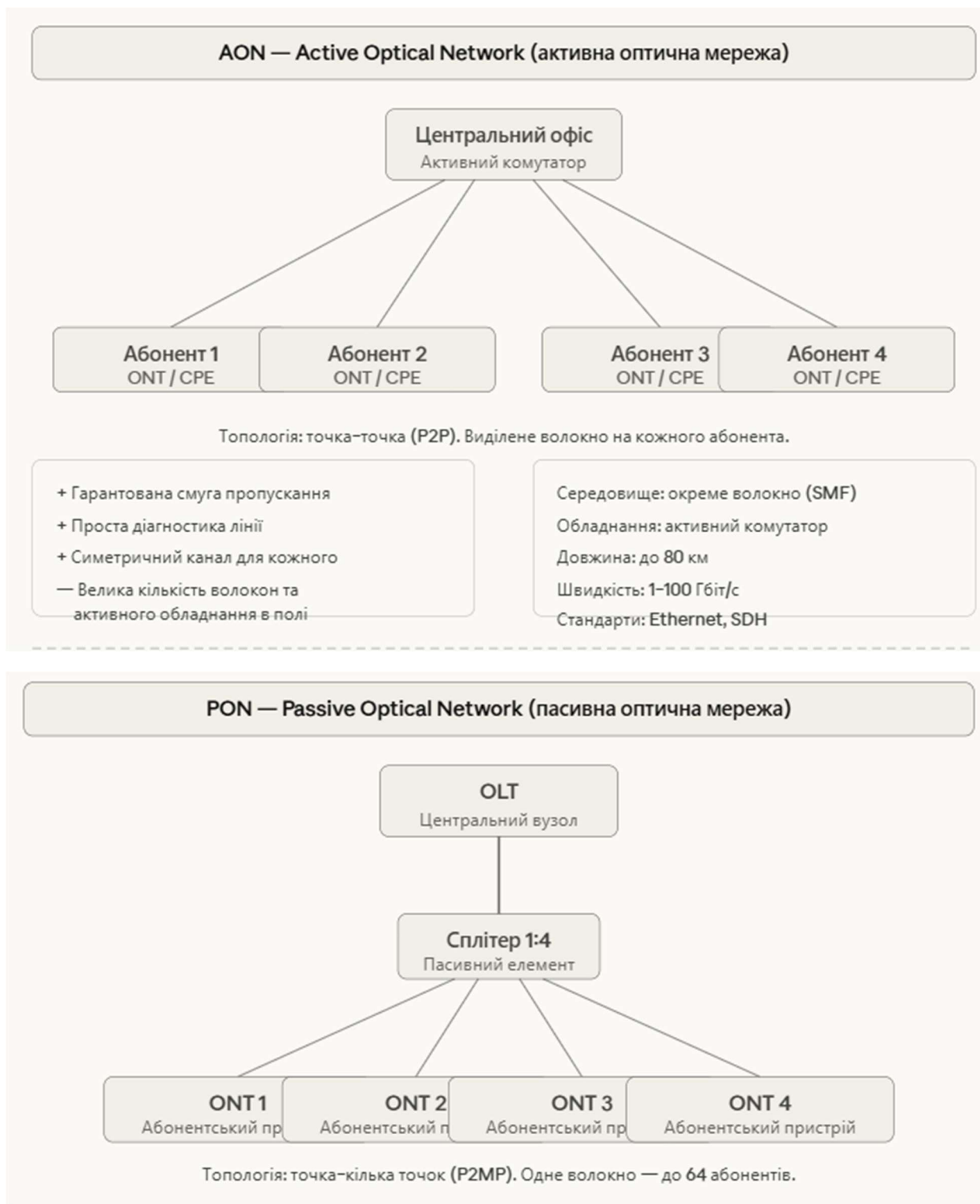


Рисунок 3.3 – Порівняння архітектур AON та PON

Центральний вузол PON — OLT (Optical Line Terminal) — розміщується у вузлі оператора та є головним активним елементом мережі. OLT здійснює управління доступом абонентів до загального середовища передавання,

динамічний розподіл пропускної здатності між абонентськими пристроями та взаємодію з мережами вищого рівня через стандартизовані інтерфейси. Абонентське обладнання представлено пристроями ONT для індивідуальних абонентів та ONU для групового підключення кількох користувачів.

3.4. Технології PON за рекомендаціями MCE-T та IEEE

Стандартизація PON здійснюється паралельно двома організаціями — MCE-T та IEEE, що призвело до появи кількох технологічних гілок. MCE-T стандартизував BPON (Broadband PON, G.983), GPON (Gigabit PON, G.984), XG-PON (G.987), XGS-PON (G.9807.1) та NG-PON2 (G.989). Під егідою IEEE розроблено стандарти EPON/GEAPON (IEEE 802.3av) та 10G-EPON (IEEE 802.3av), що разом формують широку екосистему сумісного обладнання.

Стандарт GPON (G.984) є найбільш поширеним у сучасних розгортаннях і визначає швидкості: 2,488 Гбіт/с у низхідному напрямку та 1,244 Гбіт/с у висхідному на відстані до 20 км. XGS-PON (G.9807.1) забезпечує симетричну швидкість 10 Гбіт/с і є актуальним рішенням для нових розгортань, де потрібні підвищені швидкості. Стандарт NG-PON2 (G.989) використовує технологію TWDM-PON для забезпечення сукупної пропускної здатності до 40 Гбіт/с у низхідному напрямку.

3.5. Побудова мережі ШД на базі HFC та повністю оптичної мережі кабельного телебачення

Гібридна волоконно-коаксіальна мережа (HFC — Hybrid Fiber Coaxial) поєднує переваги оптичного волокна для магістральних та розподільчих ділянок із коаксіальним кабелем на кінцевій ділянці до абонентів. Оптичне волокно забезпечує передавання сигналів від головної станції (Headend) до вузлових підсилювачів (Fiber Nodes), що обслуговують групи по 500–2000

абонентів кожен. Від вузла до абонентів сигнал передається коаксіальним кабелем через каскад підсилювачів.

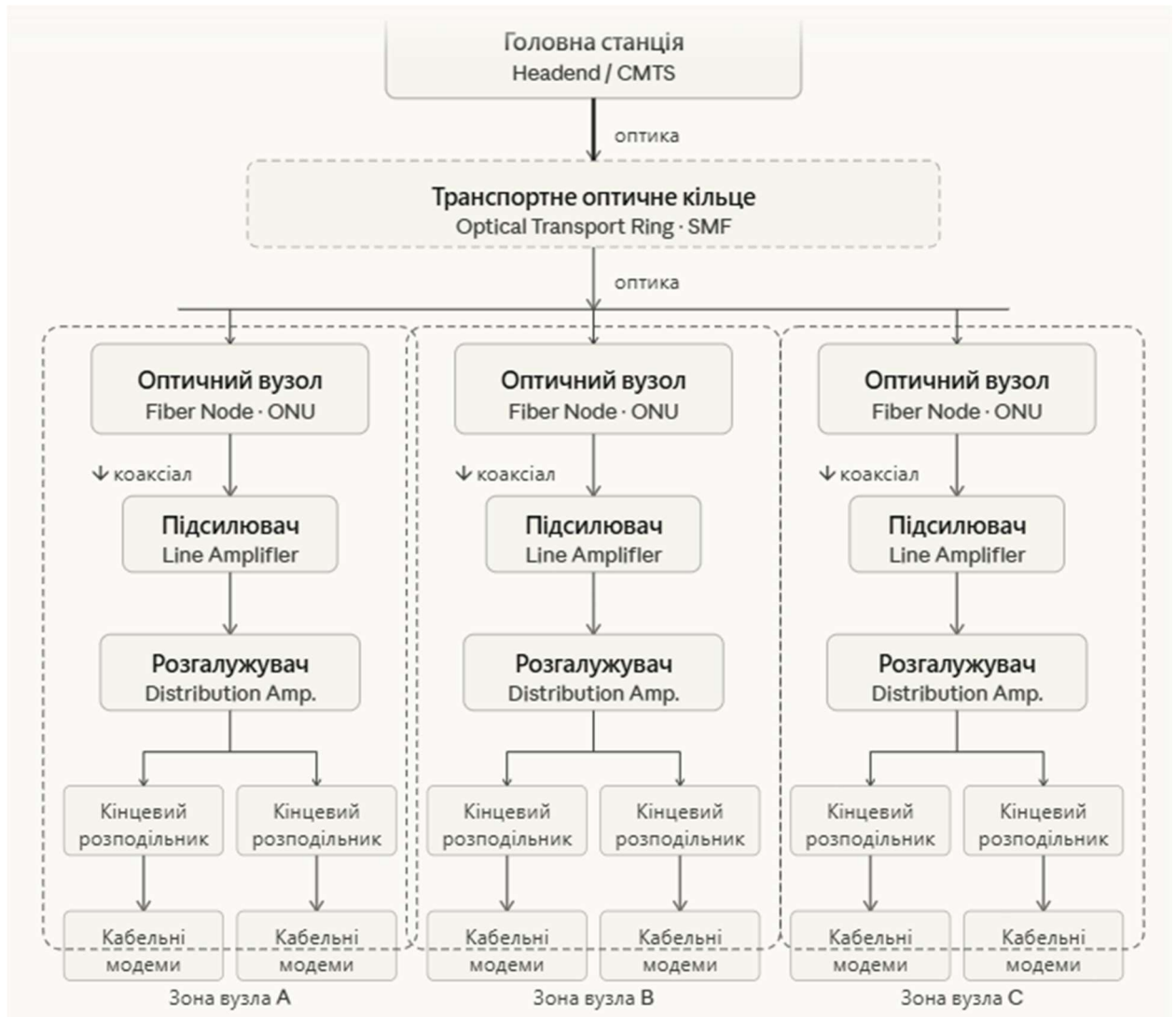


Рисунок 3.4 – Архітектура гібридної волоконно-коаксіальної мережі HFC

Стандарти DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) визначають протоколи та вимоги до обладнання HFC-мереж. Стандарт DOCSIS 3.1 забезпечує швидкості до 10 Гбіт/с у низхідному та 1 Гбіт/с у висхідному напрямку, використовуючи OFDM-модуляцію у смузі до 192 МГц. Перспективний стандарт DOCSIS 4.0 підтримує симетричні швидкості до 10 Гбіт/с за рахунок розширення робочої смуги до 1,2 ГГц та застосування технології Full Duplex.

Повністю оптична мережа кабельного телебачення є еволюцією HFC, де коаксіальний кабель замінюється оптичним волокном до кожного абонента. Такий підхід, відомий як RFoG (RF over Glass) або FTTDp (Fiber To The Distribution Point), дозволяє зберегти сумісність з наявними телевізійними приймачами та абонентськими пристроями, одночасно збільшуючи пропускну здатність та зменшуючи витрати на обслуговування порівняно з коаксіальними мережами.

Лекція 4. Системи та технології передачі мереж безпроводового доступу

4.1. Системи та технології широкосмугового радіодоступу

Безпроводовий широкосмуговий доступ є важливою альтернативою та доповненням до провідних технологій, особливо в районах зі складною інфраструктурою або для забезпечення мобільності користувачів. Основу сучасного безпроводового широкосмугового доступу становлять стандарти IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX) та стільниковий стандарт LTE (Long Term Evolution) і його наступник 5G NR.

Стандарт IEEE 802.11 (Wi-Fi) визначає технологію безпроводових локальних мереж і є найбільш широко розповсюдженою технологією безпроводового доступу для фіксованих та мобільних абонентів у межах будівлі або невеликої території. Актуальні версії стандарту — IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) та IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E) — забезпечують теоретичні швидкості до 9,6 Гбіт/с та оптимізовані механізми обслуговування множини одночасних абонентів завдяки технологіям MU-MIMO та OFDMA.

IEEE 802.16 (WiMAX — Worldwide Interoperability for Microwave Access) розроблявся як стандарт безпроводового доступу для зон обслуговування радіусом до 50 км. Стандарт WiMAX підтримує фіксований та мобільний доступ, забезпечуючи теоретичні швидкості до 70 Мбіт/с у фіксованому режимі та до 15 Мбіт/с у мобільному при смузі 10 МГц. Технологія LTE у рамках специфікацій 3GPP є домінуючим стандартом мобільного широкосмугового доступу четвертого покоління, підтримуючи пікові швидкості до 1 Гбіт/с.

Стандарт NR (New Radio) в рамках 5G забезпечує ще вищі швидкості та мінімальні затримки (менше 1 мс), що відкриває нові можливості для промислового застосування та інтернету речей. Технологія FWA (Fixed Wireless Access) на базі 5G NR у міліметровому діапазоні (mmWave)

забезпечує швидкості понад 1 Гбіт/с на абонента і розглядається як реальна альтернатива дротовому широкосмуговому доступу для останньої милі.

4.2. Системи атмосферного оптичного ШД FSO

Атмосферний оптичний зв'язок (FSO — Free Space Optical) є технологією безпроводового широкосмугового доступу, що використовує модульоване лазерне або світлодіодне випромінювання для передавання інформації через відкритий атмосферний простір. FSO поєднує переваги оптичних технологій (висока пропускна здатність, захищеність від радіоелектронних завад та підслуховування) з перевагами безпроводового підключення (відсутність необхідності прокладання кабелю та отримання дозволів на частоти).



Рисунок 4.1 – Принцип побудови системи атмосферного оптичного зв'язку FSO

Типова система FSO включає передавальний вузол з лазерним джерелом випромінювання на довжинах хвиль 785, 850, 1064 або 1550 нм, оптичну систему для формування вузькоспрямованого пучка, прийомний вузол із фотодетектором та системою наведення й стабілізації оптичної осі. Сучасні комерційні системи FSO забезпечують швидкість передавання до 10 Гбіт/с на відстанях до 2–3 км, а при сприятливих атмосферних умовах — до 5–10 км між двома точками прямої видимості.

Основним обмеженням FSO є залежність від атмосферних умов: туман, дощ, сніг та пилові бурі суттєво погіршують або повністю блокують оптичний канал. Для підвищення надійності застосовуються методи просторового різноманіття (кілька паралельних каналів), гібридні схеми FSO/RF (резервування радіоканалом), а також автоматична корекція потужності передавача залежно від стану атмосфери (APC — Automatic Power Control). Завдяки цим заходам сучасні системи FSO забезпечують доступність каналу на рівні 99,9% і вище.

Лекція 5. Обладнання мереж доступу

5.1. Характеристики стиків цифрових абонентських ліній

Стики (інтерфейси) цифрових абонентських ліній визначають електричні, механічні та протокольні характеристики точок підключення між обладнанням різних частин системи. На абонентській стороні основним є інтерфейс U — безпосередній інтерфейс між мережею оператора та приміщенням абонента по мідній парі. Інтерфейс T або S визначає точку підключення абонентських кінцевих пристроїв до абонентського мережевого модуля.

З боку мережі оператора визначаються стик V (між вузлом доступу та мережею агрегації) та стик Q (інтерфейс управління між системою управління мережею та обладнанням). У сучасних системах широко використовується інтерфейс Ethernet як уніфікований транспортний стик між DSLAM та мережею агрегації оператора, що спрощує архітектуру та знижує вартість як капітальних, так і операційних витрат.

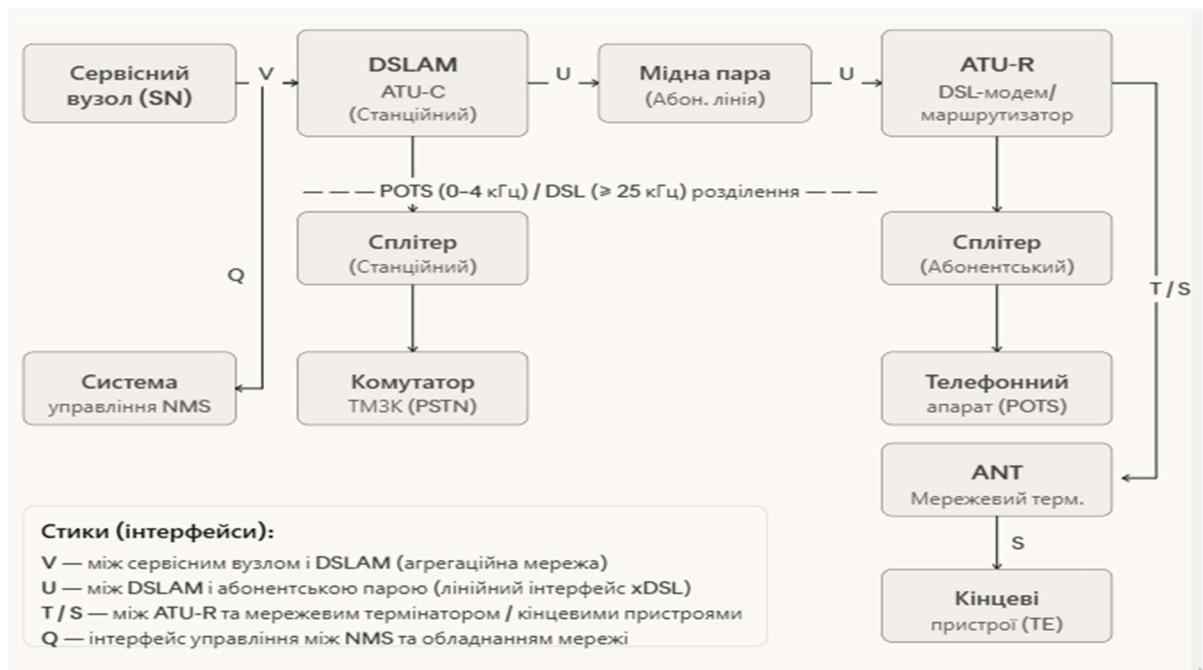


Рисунок 5.1 – Стики та еталонна конфігурація системи xDSL

5.2. Еволюція цифрових абонентських ліній

Еволюція технологій xDSL відображає прагнення до підвищення пропускної здатності при збереженні сумісності з наявною мідною інфраструктурою телефонної мережі. Перше покоління систем DSL — ISDN-BRI та HDSL — з'явилося на початку 1990-х років і вирішувало задачу цифрового підключення корпоративних абонентів із симетричними швидкостями порядку 160 кбіт/с — 2 Мбіт/с, що було значним кроком уперед порівняно з аналоговими модемами.

Масовий споживчий ринок відкрило впровадження асиметричного ADSL наприкінці 1990-х — на початку 2000-х років. Подальший розвиток ішов шляхом підвищення швидкостей (ADSL2+, VDSL, VDSL2) та скорочення довжини абонентської лінії за рахунок виносу DSLAM до вуличних кабінетів. Технологія G.fast є вершиною еволюції мідних технологій, що наближає їх за пропускною здатністю до оптичних рішень при ультракоротких лініях і є проміжним рішенням перед повним переходом на FTTH.

5.3. Структурні схеми та архітектура абонентського і станційного напівкомплектів xDSL

Станційний напівкомплект xDSL реалізується у вигляді рядних плат (line cards) у шасі DSLAM. Кожна плата містить від 24 до 96 портів xDSL і складається з аналогового фронт-енду (AFE — Analog Front End), цифрового сигнального процесора (DSP), блоку керування та живлення, а також контролера інтерфейсу до об'єднувальної шини шасі. Сучасні DSLAM реалізуються у вигляді стійкового обладнання для вузових кімнат або малогабаритних вуличних шаф.

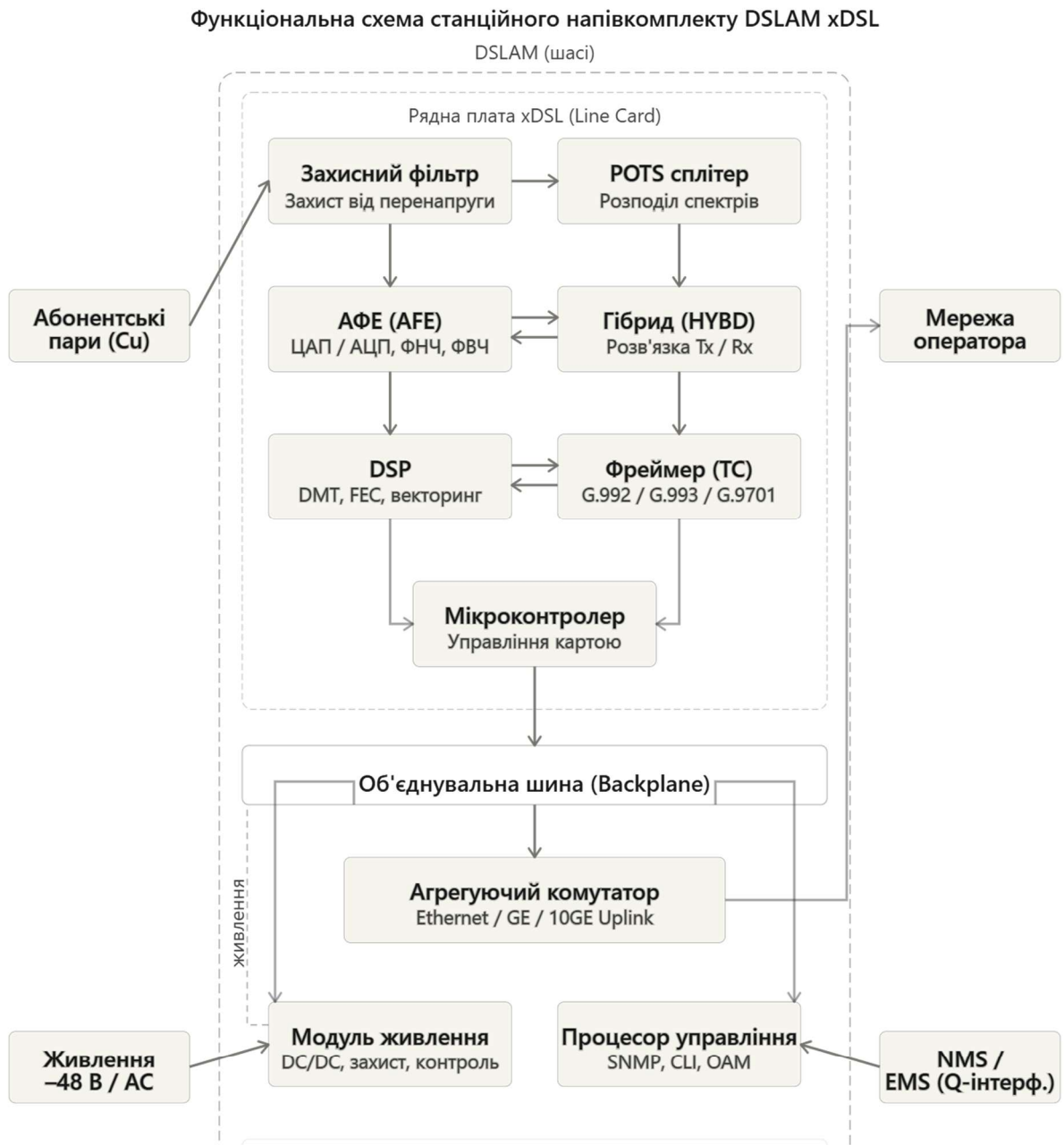


Рисунок 5.2 – Функціональна схема станційного напівкомплекту DSLAM xDSL

Абонентський напівкомплект (CPE — Customer Premises Equipment) представлений DSL-модемом або DSL-маршрутизатором і виконує функції,

симетричні до станційного напівкомплекту, але адаптовані для встановлення в абонентських приміщеннях. Сучасний DSL-маршрутизатор інтегрує функції DSL-модему, Ethernet-комутатора, маршрутизатора, точки доступу Wi-Fi та VoIP-адаптера, що дозволяє надати абоненту повний набір послуг Triple Play через один компактний пристрій.

5.4. Обладнання мереж доступу PON

Обладнання центрального вузла PON — OLT (Optical Line Terminal) — є найбільш складним та функціонально насиченим активним елементом мережі PON. OLT виконує функції формування та обробки оптичних сигналів низхідного та висхідного напрямків, управління доступом ONT/ONU до висхідного каналу засобами динамічного розподілу смуги (DBA — Dynamic Bandwidth Allocation), управління топологією мережі, забезпечення безпеки засобами шифрування AES, а також взаємодії з мережами вищого рівня через стандартизовані інтерфейси.

Абонентське обладнання PON підрозділяється на два типи: ONT (Optical Network Terminal) — індивідуальний пристрій для підключення одного абонента, та ONU (Optical Network Unit) — груповий пристрій для підключення кількох абонентів у житловому будинку або офісному центрі. ONT зазвичай розміщується безпосередньо в приміщенні абонента і надає інтерфейси Ethernet, POTS для аналогового телефону, CATV для підключення телевізора, а нерідко — і вбудовану точку доступу Wi-Fi.

Пасивні оптичні розгалужувачі (сплітери) є ключовим пасивним компонентом PON-мережі, що забезпечує рівномірний або нерівномірний розподіл оптичного сигналу між вихідними портами. Вони реалізуються на основі планарної хвилеводної технології (PLC — Planar Lightwave Circuit) або технології зварних розгалужувачів. Внесені оптичні втрати у сплітері є

визначальним фактором для розрахунку оптичного бюджету PON-лінії та вибору максимально допустимого коефіцієнта розгалуження.

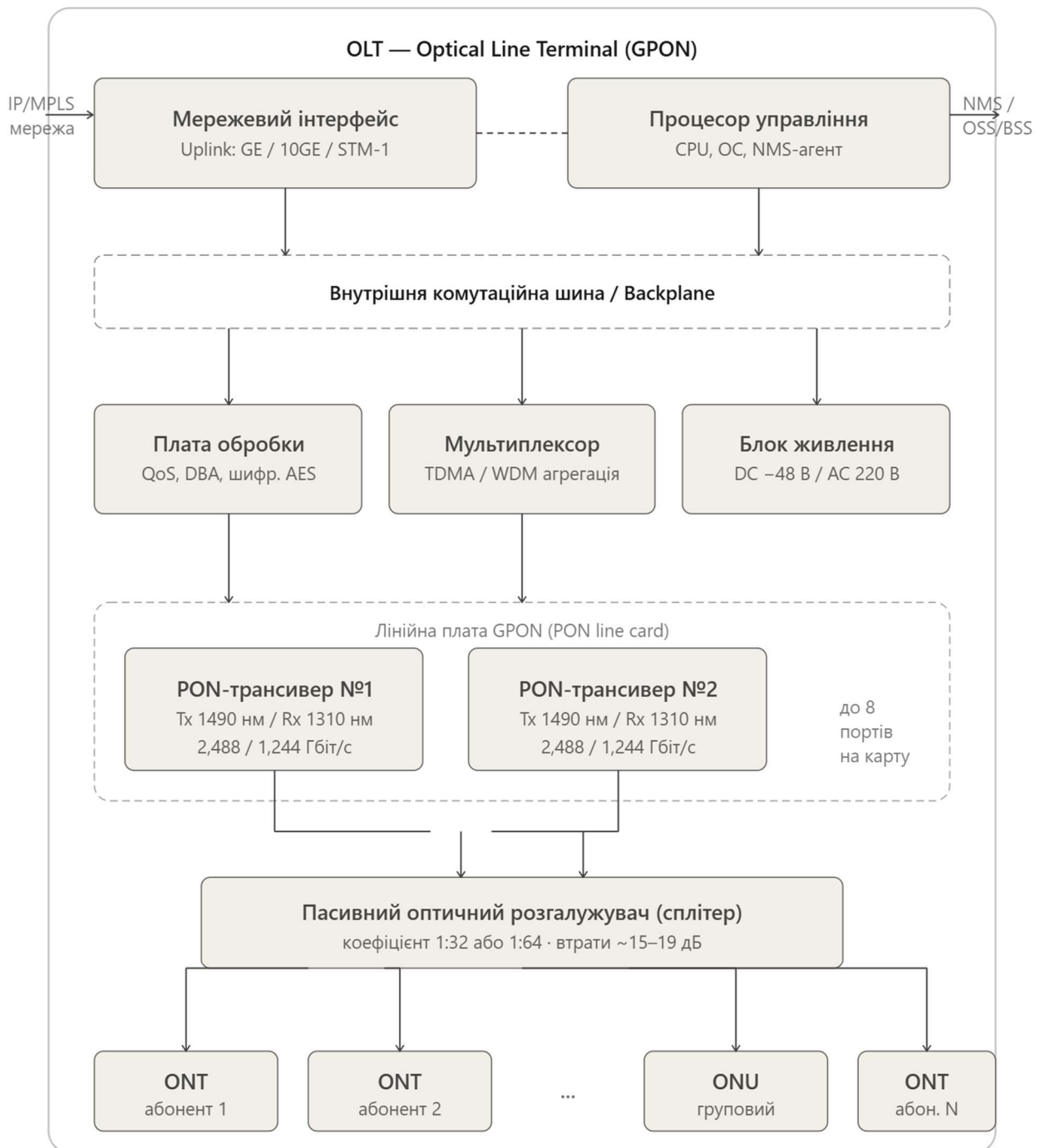


Рисунок 5.3 – Структурна схема обладнання OLT системи GPON

Лекція 6. Проектування транспортних мереж та мереж доступу

6.1. Аналіз вимог та оцінка потреб у пропускній здатності мережі

Проектування сучасних транспортних мереж та мереж доступу розпочинається з детального аналізу вимог замовника та прогнозування потреб у пропускній здатності. На цьому етапі визначаються типи послуг, що планується надавати (широкосмуговий інтернет-доступ, IP-телебачення, VoIP, корпоративні VPN-сервіси тощо), кількість абонентів та їхній розподіл за категоріями, прогноз зростання абонентської бази та трафіку на розрахунковий термін, а також вимоги до якості обслуговування і надійності мережі.

Розрахунок потрібної пропускну здатності здійснюється на основі показника навантаження (traffic engineering), що враховує пікові та середні значення споживання смуги одним абонентом для кожного типу послуги, а також коефіцієнт одночасності (contention ratio). Методологія розрахунку трафіку базується на рекомендаціях MCE-T та ETSI і є основою для обґрунтування вибору технічних рішень та об'ємів фінансування проекту.

6.2. Формулювання технічного завдання на проектування

Технічне завдання (ТЗ) на проектування є ключовим документом, що визначає межі та параметри майбутнього проекту. ТЗ формулюється на основі результатів аналізу вимог і включає: опис цільової зони обслуговування, вимоги до технічних характеристик мережі (мінімальна та максимальна швидкість на абонента, доступність сервісів, затримка, джиттер), вимоги до масштабованості та резервування, обмеження за вартістю та терміном будівництва, а також нормативні та регуляторні вимоги.

Грамотно складене ТЗ є запорукою успішного проектування та подальшого будівництва мережі, оскільки дозволяє уникнути неоднозначностей у трактуванні вимог і забезпечує чіткі критерії для приймальних випробувань готової мережі. ТЗ затверджується замовником та виконавцем і набуває юридичної сили як невід'ємний додаток до договору на проектування.

6.3. Вибір технологій та стандартів

Вибір технологій та стандартів для побудови мережі здійснюється на основі порівняльного аналізу доступних рішень за критеріями технічної відповідності вимогам ТЗ, сукупної вартості власності (TCO — Total Cost of Ownership), ступеня зрілості технології та наявності стандартів, можливостей масштабування та розвитку мережі, а також наявності кваліфікованих кадрів для монтажу й обслуговування. Остаточне рішення базується на результатах техніко-економічного аналізу альтернативних варіантів.

У сучасних проектах мереж доступу для жилих кварталів переважають рішення на базі GPON або XGS-PON, тоді як для промислових зон та об'єктів з підвищеними вимогами до надійності та симетричності каналу доцільним є вибір AON або активної Ethernet-топології P2P. Для районів з низькою щільністю абонентів або відсутністю інфраструктури для прокладання кабелю розглядаються варіанти Fixed Wireless Access (FWA) на базі LTE або 5G NR.

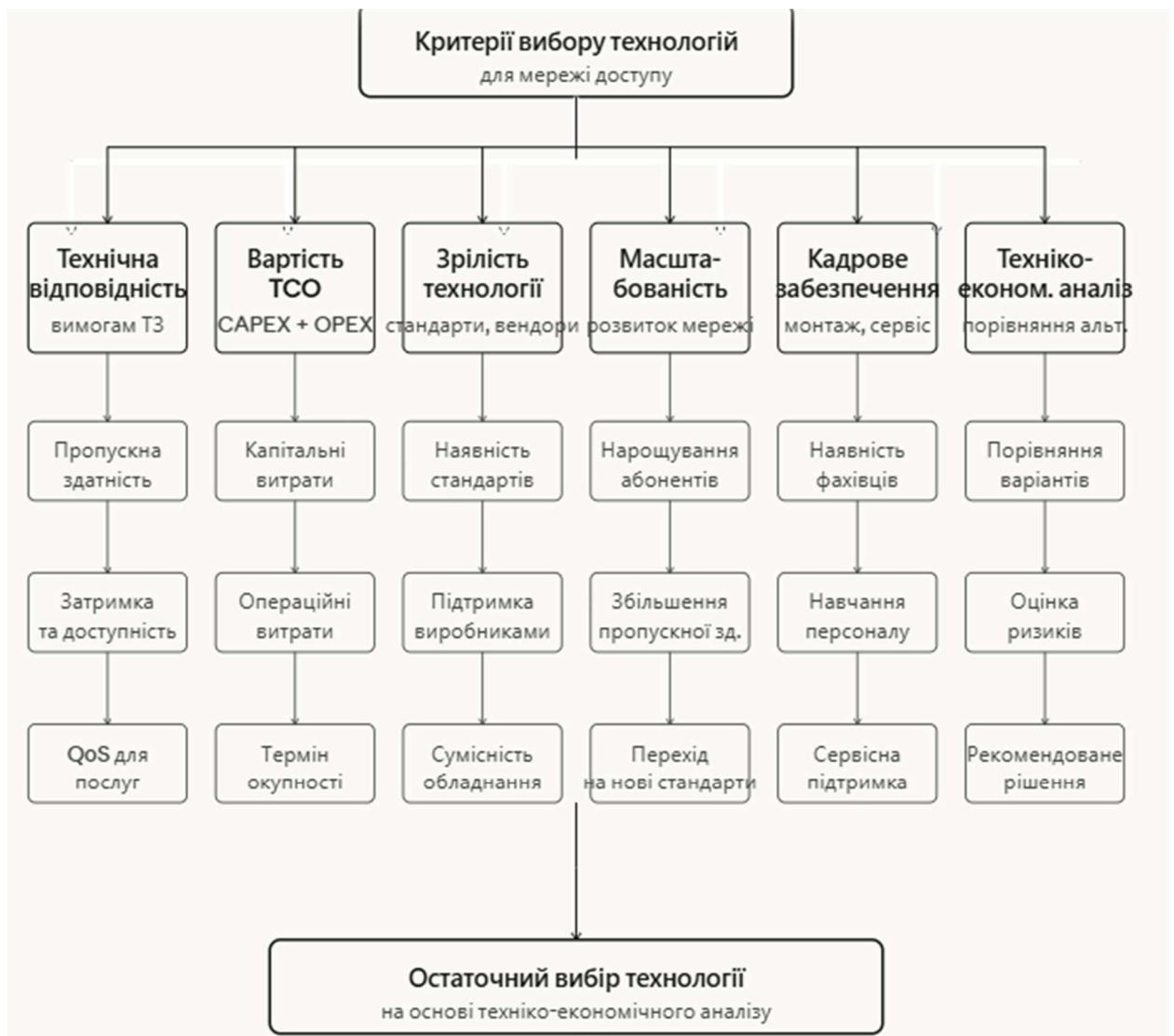


Рисунок 6.1 – Критерії вибору технологій для мережі доступу

6.4. Розробка фізичної та логічної архітектури мережі

Фізична архітектура мережі визначає розміщення вузлів (OLT, DSLAM, базових станцій, маршрутизаторів), трасування кабелів та трактів бездротового зв'язку, вибір типів кабелів (тип волокна, кількість волокон, захисні характеристики), розміщення колодязів та кабельних каналів, а також схеми живлення та заземлення обладнання. Фізичне проектування виконується із застосуванням геоінформаційних систем (ГІС), що дозволяє враховувати реальну топографію та наявну інфраструктуру.

Логічна архітектура описує схему взаємодії між функціональними блоками мережі незалежно від їхнього фізичного розміщення. Вона включає схему адресації (IP-адресний план), план VLAN-сегментації та розподілу трафіку між послугами, схему маршрутизації та протоколи динамічної маршрутизації, архітектуру системи управління та інтеграції з системами білінгу, а також схему резервування на логічному рівні з використанням протоколів BFD, RSTP або ERPS.

6.5. Забезпечення безпеки мережі від несанкціонованого доступу та атак

Забезпечення інформаційної безпеки мережі є невід'ємною частиною процесу проектування, а не надбудовою, що додається постфактум. Основні загрози для мереж доступу включають несанкціонований доступ до послуг та ресурсів мережі, атаки типу «відмова в обслуговуванні» (DoS/DDoS), перехоплення та модифікацію трафіку, а також компрометацію облікових даних абонентів. Для нейтралізації цих загроз в архітектурі мережі реалізується комплекс захисних заходів на різних рівнях моделі OSI.

Ключовими механізмами захисту в мережах доступу є: ізоляція абонентів засобами VLAN та PVLAN, що запобігає взаємодії між абонентами на рівні 2 моделі OSI; аутентифікація абонентів за протоколом PPPoE або

802.1X; шифрування трафіку в ONT за алгоритмом AES-128 у системах PON; фільтрація мережевого трафіку засобами ACL та firewall; а також системи виявлення та запобігання вторгненням (IDS/IPS), що забезпечують моніторинг та реагування на загрози в режимі реального часу.

6.6. Реалізація проекту та підготовка документації

Реалізація проекту мережі включає кілька послідовних фаз: будівельно-монтажні роботи (прокладання кабелів, монтаж пасивної розподільчої інфраструктури, встановлення обладнання), пусконаладжувальні роботи (конфігурування обладнання, перевірка параметрів лінійного тракту, тестування послуг), та приймальні випробування з перевіркою відповідності реалізованої мережі вимогам ТЗ. Кожна фаза завершується оформленням відповідного акту та технічної документації.

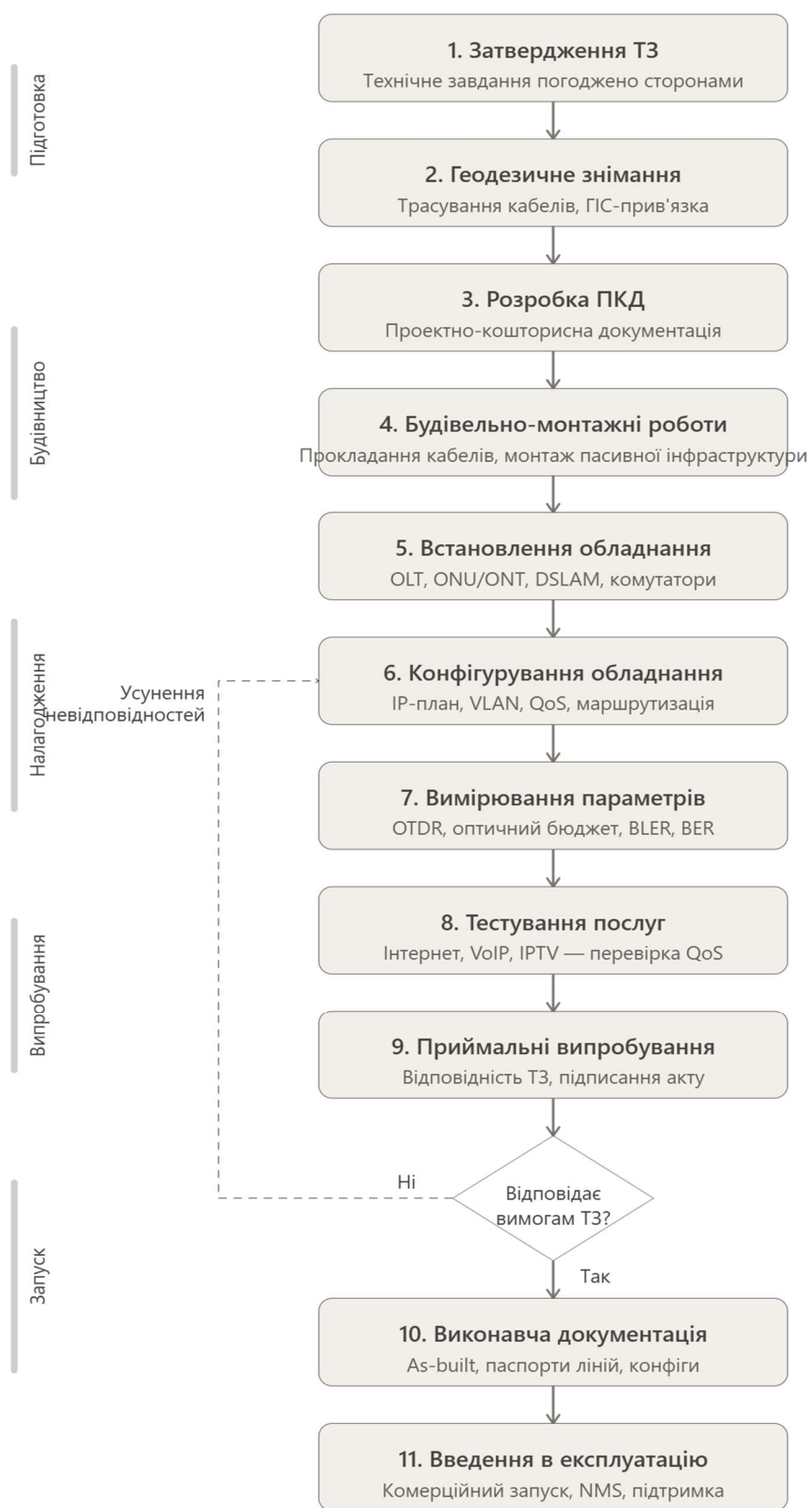


Рисунок 6.2 – Процес реалізації проекту мережі доступу

Технічна документація мережі є необхідним інструментом для подальшої експлуатації та розвитку і включає: виконавчу документацію (as-built drawings) з реальним розміщенням обладнання та трасуванням кабелів, паспорти кабельних ліній із результатами вимірювань (рефлектограми, загасання), логічні схеми мережі та таблиці адресації, конфігураційні файли обладнання та їхній архів, а також інструкції з налаштування та процедури відновлення після відмов (Runbooks).

Підготовка до подальшої експлуатації передбачає навчання персоналу служби технічної підтримки, налаштування системи моніторингу та управління мережею (NMS), визначення процедур реагування на аварійні ситуації та планового технічного обслуговування, а також впровадження системи обліку ресурсів (inventory management) для контролю стану обладнання та ліній зв'язку протягом усього терміну експлуатації мережі.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Голь В.Д., Ірха М.С. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: навчальний посібник. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 250 с.
2. Тарбаєв С.І., Домрачева К.О., Заїка В.Ф., Трембовецький М.П. Проектування інфокомунікаційних мереж. Навчальний посібник.. – Київ: ННІТІ ДУТ, 2019. – 151 с.
3. Горбатий І. В., Бондарєв А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи. – Львів: Львівська політехніка, 2016. – 336 с.
4. Кайдан М. В., Климаш М. М., Стрихалюк Б. М. Напрямні системи телекомунікаційних мереж. – Львів: Львівська політехніка, 2021. – 488 с.
5. П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підручник для вищих навчальних закладів. – К.:САММІТ-КНИГА, 2010. –640 С.: іл.
6. Буров Є.В. Комп'ютерні мережі: Підручник / Буров Є.В., Митник М.М. За заг. ред. Пасічника В.В. Львів: Магнолія 2019. – 204 с.
7. Горбатий І. В., Бондарєв А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи. Львівська політехніка, 2016. – 336 с.
8. Комп'ютерні мережі. Локальні комп'ютерні мережі. Методичні вказівки до комп'ютерного практикуму. [Текст] / Уклад.: О.Ю. Кулаков, Р.Ю. Берест – К.: НТУУ «КПІ», 2012. –164 с.
9. Комп'ютерні мережі. Загальні принципи функціонування комп'ютерних мереж : Навчальний посібник / С. В. Мінухін, С. В. Кавун, С. В. Знахур. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2008. – 210 с.