

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ-систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»
ІНТЕГРАЦІЯ ФІКСОВАНОГО ЗВ'ЯЗКУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ
GPRN В СТІЛЬНИКОВІ МЕРЕЖІ**

**INTEGRATION OF FIXED COMMUNICATION USING GPRN
TECHNOLOGY INTO CELLULAR NETWORKS**

спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ТК-41

Штампко Назар Олександрович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
Євсюк Микола Миколайович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент Євсюк Микола Миколайович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти: бакалавр
Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма: «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ
« _____ » _____ 202__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Штампу Назару Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: *«Інтеграція фіксованого зв'язку за технологією GPON в стільникові мережі»*

керівник роботи: *к.т.н., доцент Євсюк Микола Миколайович.*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 р. № 558/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: 04.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *об'єкт розробки: гібридна транспортна інфраструктура для стільникової мережі; базова технологія: пасивна оптична мережа GPON (ITU-T G.984); пропускна здатність висхідного каналу для обслуговування базових станцій – не менше 300 Мбіт/с; структура трафіку – мультисервісна (пріоритезація голосу, даних та сигнальних повідомлень 4G / 5G); фізична довжина траси – до 20 км; вимоги до надійності забезпечення якості обслуговування (QoS) та моніторингу (OAM / BFD); характеристики обладнання (OLT, термінали БС) та схема виконання траси.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Розділ 1 Теоретичне обґрунтування використання GPON для потреб стільникових операторів

Розділ 2 Розробка та розрахунок параметрів транспортної інфраструктури стільникової мережі на базі технології GPON

Розділ 3 Технічне забезпечення та адаптація інфраструктури GPON до вимог стільникових мереж

Розділ 4 Охорона праці

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації Power Point

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Євсюк М. М., доцент</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Євсюк М. М., доцент</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Євсюк М. М., доцент</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Євсюк М. М., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	_____ %		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Євсюк М. М., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 31 грудня.2025 р..

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури за темою кваліфікаційної роботи</i>	до 01.03.2026 р.	
2.	<i>Розділ 1</i>	до 23.04.2026 р.	
3.	<i>Розділ 2</i>	до 09.05.2026 р.	
4.	<i>Розділ 3</i>	до 23.05.2026 р.	
5.	<i>Розділ 4</i>	до 27.05.2026 р.	
6.	<i>Висновки</i>	до 30.05.2026 р.	
7.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 30.05.2026 р.	
8.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 30.05.2026 р.	
9.	<i>Нормоконтроль</i>	до 02.06.2026 р.	
10.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 03.06.2026 р.	
11.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Штампко Н. О.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Євсюк М. М.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Штампко Н. О. Інтеграція фіксованого зв'язку за технологією GPON в стільникові мережі. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Телекомунікації та радіотехніка» спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновку та списку використаних джерел.

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження та розроблено інтегровану транспортну мережу стільникового зв'язку на базі технології GPON. Проаналізовано вимоги сучасних мобільних мереж щодо високої пропускної здатності та точної синхронізації, а також здійснено порівняльний аналіз транспортних технологій, що підтвердив доцільність використання GPON як економічно ефективної альтернативи традиційним рішенням. Обґрунтовано архітектуру мережі з використанням OLT як вузла агрегації та розроблено топологію з механізмом резервування, що забезпечує високий рівень надійності. Проведено розрахунки параметрів QoS та оптичного бюджету, які підтвердили працездатність і ефективність запропонованої мережі. Запропоновано використання сучасного телекомунікаційного обладнання, що відповідає вимогам стандарту 4G та забезпечує можливість подальшої міграції до 5G без значної модернізації інфраструктури.

Ключові слова: стільниковий зв'язок 4G / 5G, базова станція, GPON, транспортна мережа, оптичний кабель, оптичний термінал, оптичний бюджет.

ANNOTATION

Shtampko N. O. Integration of fixed communication using GPON technology into cellular networks. Manuscript.

Bachelor's qualifying work of EP «Telecommunications and radio engineering» specialty 172 Telecommunications and radio engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's qualifying work consists of an introduction, four sections, a conclusion and a list of information sources.

In the qualification work, a comprehensive study was performed and an integrated cellular transport network based on GPON technology was developed. The requirements of modern mobile networks for high bandwidth and precise synchronization were analyzed, and a comparative analysis of transport technologies was carried out, which confirmed the feasibility of using GPON as a cost-effective alternative to traditional solutions. The network architecture using OLT as an aggregation node was substantiated and a topology with a Dual-Parenting redundancy mechanism was developed, which ensures a high level of reliability. Calculations of QoS and optical budget parameters were carried out, which confirmed the operability and efficiency of the proposed network. The use of modern telecommunications equipment that meets the requirements of the 4G standard and provides the possibility of further migration to 5G without significant infrastructure modernization was proposed.

Keywords: 4G/5G Cellular Communication, Base Station, GPON, Transport Network, Optical Cable, Optical Terminal, Optical Budget.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

BFD (Bidirectional Forwarding Detection) – виявлення двонаправленої переадресації;

CBU (Customer Baseband Unit) – блок базової смуги частот клієнта;

DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) – динамічний розподіл пропускної здатності;

DOM (Digital Optical Monitoring) – цифровий оптичний моніторинг;

eMBB (Enhanced Mobile Broadband) – покращений мобільний широкосмуговий доступ;

eOTDR (Embedded Optical Time Domain Reflectometer) – це вбудований оптичний рефлектометр

FMC (Fixed-Mobile Convergence) – конвергенція фіксованого та мобільного зв'язку

GEM Ports (GPON Encapsulation Method Ports) – порти методу інкапсуляції GPON;

GPON (Gigabit PON) – гігабітна пасивна оптична мережа;

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – інститут інженерів з електротехніки та електроніки;

IoT (Internet of Things) – інтернет речей;

IP/MPLS (Internet Protocol / Multiprotocol Label Switching) – інтернет-протокол / багатопроTOCOLьна комутація міток;

ITU (International Telecommunication Union) – міжнародний союз електроЗВ'язку;

LACP (Link Aggregation Control Protocol) – протокол керування агрегацією каналів;

Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) – декілька входів декілька виходів;

mMTC (massive Machine Type Communications) – масові машинні комунікації;

OAM (Operations, Administration, and Maintenance) – операції, адміністрування та технічне обслуговування;

ODN (Optical Distribution Network) – оптична розподільча мережа;

OLT (Optical line terminal) – центральний термінал мережі PON;

ONU (Optical Network Unit) - оптичний мережевий вузол;

PLC (Planar Lightwave Circuit) – планарний дільник для PON мереж;

PON (Passive optical network) – пасивна оптична мережа;

PWE3 (PseudoWire Emulation Edge-to-Edge) – емуляція псевдодроту від краю до краю;

QCI (QoS Class Identifier) – ідентифікатор класу QoS;

QoS (Quality of Service) – якість обслуговування;

SFP (Small Form-factor Pluggable) – модульний компактний приймач (трансивер);

SLA (Service Level Agreement) – угода про рівень послуг;

SyncE (Synchronous Ethernet) – синхронний Ethernet;

T-CONT (Transmission Container) – трансмісійний контейнер;

TDD (Time Division Duplexing) – дуплекс із часовим розділенням;

URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) – надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою;

ViLTE (Video over LTE) – відео через LTE;

VLAN (Virtual Local Area Network) – віртуальна локальна мережа;

VoLTE (Voice over LTE) – голос через LTE;

VoNR (Voice over New Radio) – озвучування New Radio;

WDM (Wave length Division Multiplexing) – спектральне ущільнення каналів передачі.

XG-PON (10-Gigabit-capable Passive Optical Network – 10 гігабітна пасивна оптична мережа.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ GPON ДЛЯ ПОТРЕБ СТІЛЬНИКОВИХ ОПЕРАТОРІВ	12
1.1 Аналіз вимог сучасних стільникових мереж (4G / 5G) до транспортної інфраструктури	12
1.2 GPON як фундамент для стільникової транспортної мережі ...	15
1.3 Порівняльний аналіз GPON з традиційними методами підключення базових станцій стандарту 4G	17
1.4 Інтеграція GPON та стільникових мереж	20
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ GPON.....	23
2.1 Побудова топології мережі: поєднання OLT з ядром стільникової мережі стандарту 4G	23
2.2 Розрахунок параметрів якості обслуговування для пріоритезації голосового та сигнального трафіку базових станцій 4G	26
2.3 Резервування каналів у GPON-мережі	32
2.4 Розрахунок оптичного бюджету траси від вузла агрегації до віддалених модулів базових станцій	33
2.5 Функціональна схема із резервуванням за технологією GPON для стільникової мережі	35
2.6 Вибір телекомунікаційного обладнання для побудови транспортної GPON мережі	36
РОЗДІЛ 3 ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АДАПТАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ GPON ДО ВИМОГ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ	38
3.1 Характеристика оптичного лінійного терміналу Huawei MA5800-X2	38

3.2 Вибір SFP трансиверів	42
3.3 Характеристика оптичного терміналу базової станції	43
3.4 Вибір оптичних кабелів	44
3.5 Синхронізація частоти та часу (PTP IEEE 1588, SyncE) в мережах GPON для коректної роботи софт-хендоверу.....	47
3.6 Методи моніторингу та діагностики інтегрованої лінії зв'язку в реальному часі	48
3.7 Адаптація розробленої GPON-інфраструктури до вимог стільникового зв'язку п'ятого покоління	50
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	52
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів	52
4.2 Зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів	53
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58

ВСТУП

В умовах стрімкого розвитку телекомунікаційних технологій спостерігається зростання попиту на високошвидкісні та надійні мережі зв'язку. Розвиток стільникових мереж поколінь 4G та 5G, а також збільшення кількості користувачів і обсягів переданих даних вимагають ефективних рішень для організації транспортної інфраструктури.

Одним із перспективних напрямів є інтеграція фіксованих мереж доступу, зокрема технології GPON, у стільникові мережі. Використання GPON дозволяє забезпечити високошвидкісну передачу даних, знизити витрати на розгортання мережі та підвищити ефективність використання ресурсів. Технологія GPON базується на використанні пасивних оптичних мереж, що дозволяє організувати передачу даних між центральним вузлом та базовими станціями без використання активного обладнання. Це забезпечує високу надійність, енергоефективність та масштабованість системи.

Актуальність даної роботи полягає у дослідженні інтеграції фіксованого зв'язку на базі технології GPON у стільникові мережі. Такий підхід дозволяє операторам використовувати єдину оптичну платформу (конвергентну інфраструктуру) для обслуговування як домашніх абонентів, так і базових станцій, забезпечуючи при цьому високу швидкість, масштабованість та значне зниження капітальних витрат.

Метою роботи є опрацювання технічного рішення щодо інтеграції технології GPON у транспортну інфраструктуру сучасних стільникових мереж для забезпечення ефективної передачі трафіку від базових станцій до ядра мережі з можливістю подальшого її масштабування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати вимоги до транспортної інфраструктури сучасних стільникових мереж на базі технології PON та порівняти існуючі рішення.
2. Дослідити архітектурні аспекти побудови стільникової транспортної

мережі на базі технології GPON.

3. Розробити топологію інтегрованої мережі, що поєднує сегмент доступу GPON із ядром стільникової мережі стандарту 4G, та деталізувати її складові.

4. Розрахувати параметри якості обслуговування (QoS) та оптичний бюджет транспортної мережі GPON на ділянці від вузла агрегації до модулів базової станції.

5. Розробити функціональну схему транспортної стільникової мережі за технологією GPON.

6. Обґрунтувати вибір телекомунікаційного обладнання для побудови транспортної GPON-мережі та проаналізувати його технічні характеристики.

7. Оцінити особливості функціонування пасивної транспортної мережі, визначити перспективи її масштабування та можливості впровадження технологій наступного покоління (5G).

Об'єктом дослідження є процеси передачі та агрегації мультисервісного трафіку стільникових мереж через транспортну інфраструктуру, побудовану на базі пасивних оптичних мереж.

Предметом дослідження є архітектура, топологія, параметри якості обслуговування QoS та методи синхронізації в інтегрованій мережі GPON, що виконує роль транспортного рішення для базових станцій 4G / 5G.

Результати роботи можуть бути використані операторами зв'язку для побудови конвергентних мереж, що поєднують фіксований широкосмуговий доступ та мобільний бекхол.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, та генерації рисунків виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ GRON ДЛЯ ПОТРЕБ СТІЛЬНИКОВИХ ОПЕРАТОРІВ

1.1 Аналіз вимог сучасних стільникових мереж (4G / 5G) до транспортної інфраструктури

Еволюція стільникового зв'язку від 3G до 4G, а в перспективі і 5G докорінно змінила архітектуру транспортних мереж (backhaul). Сучасні мобільні мережі четвертого (4G/LTE) та п'ятого покоління (5G) характеризуються стрімким зростанням обсягів переданих даних і появою нових сервісів, що потребує підвищені вимоги до транспортної інфраструктури. Зокрема, базові станції повинні передавати значні обсяги трафіку до ядра мережі через транспортні сегменти, де ключову роль відіграють параметри пропускної здатності, затримки, надійності та синхронізації.

Однією з основних вимог є забезпечення високої пропускної здатності. «У мережах 4G типова швидкість передачі даних для одного абонента становить приблизно 10...100 Мбіт/с, тоді як пікові значення можуть досягати 150...300 Мбіт/с і навіть до 1 Гбіт/с за використання агрегації несівних. У мережах 5G ці показники значно зростають: середня швидкість може становити 100...500 Мбіт/с, а пікові значення досягають 1...10 Гбіт/с. Це означає, що одна базова станція може генерувати трафік на рівні від 1 до 10 Гбіт/с, а в густонаселених районах – навіть більше» [1]. Відповідно, транспортна мережа повинна підтримувати такі навантаження, забезпечуючи достатню пропускну здатність каналів і ефективний розподіл ресурсів.

Важливою в цій еволюції є вимога до затримки передачі даних. «У мережах 4G типове значення затримки становить 30...50 мс, тоді як у 5G цей показник знижується до рівня 1...10 мс, а для важливих сервісів класу URLLC – навіть до 1 мс» [1]. Такі жорсткі вимоги обумовлені необхідністю підтримки сервісів реального часу, включаючи автономний транспорт, промислову

автоматизацію та дистанційні операції. При цьому транспортна мережа повинна мінімізувати додаткові затримки, які можуть виникати внаслідок буферизації або механізмів розподілу пропускної здатності.

Джиттер (варіація затримки) для більшості сервісів не повинен перевищувати 5...10 мс, а для важливих застосувань – 1...2 мс. Високий рівень джиттера негативно впливає на якість голосових і відеосервісів, таких як VoLTE або VoNR, які потребують стабільного часу доставки інформаційних пакетів. Тому транспортна мережа повинна забезпечувати рівномірну передачу трафіку без значних коливань затримки [1].

Також слід відмітити, що для сучасних стільникових систем рівень доступності повинен становити не менше ніж 99,99...99,999 %, що загалом відповідає простою не більше декількох хвилин протягом року. Для досягнення таких показників передбачаються механізми резервування каналів і обладнання, а також автоматичне перемикання при відмовах. Час відновлення після аварії зазвичай не повинен перевищувати 50...100 мс для стратегічно важливих сервісів.

Особливу роль відіграє синхронізація стільникової мережі. У мережах 4G, особливо при використанні режиму TDD, а також у 5G із технологіями Massive MIMO, необхідна висока точність синхронізації часу. «Типові вимоги передбачають точність синхронізації на рівні $\pm 1,5$ мкс для LTE та до ± 100 нс для 5G. Для цього використовуються технології SyncE та IEEE 1588 v2 (PTP), які повинні підтримуватися транспортною мережею без значних втрат точності» [1].

Також, сучасні стільникові мережі повинні забезпечувати різні рівні якості обслуговування QoS для різних типів трафіку. Зокрема, сервіси eMBB потребують високої пропускної здатності у сотні Мбіт/с, а в перспективі для URLLC – мінімальної затримки (менше 1...10 мс) і високої надійності (до 99,999 %), а для mMTC – підтримки великої кількості пристроїв за відносно невеликого обсягу трафіку. Це вимагає від транспортної мережі можливості гнучкого управління ресурсами, включаючи пріоритезацію та гарантоване

виділення смуги пропускання.

Ще однією важливою характеристикою є масштабованість мережі. Зі зростанням кількості користувачів і пристроїв, а також із розвитком нових сервісів, мережа повинна підтримувати поступове збільшення пропускної здатності без значної перебудови інфраструктури: кількість підключених пристроїв у 5G може досягати $10^5 \dots 10^6$ на квадратний кілометр, що потребує відповідної адаптації транспортного сегмента.

Актуальною вимогою сьогодення є енергоефективність. З огляду на те, що сучасні базові станції можуть споживати від сотень ват до кількох кіловат електроенергії, а транспортна інфраструктура також потребує живлення, зменшення енергоспоживання стає важливим фактором оптимізації витрат оператора.

Узагальнені порівняльні характеристики вимог до сучасної транспортної інфраструктури для стільникових мереж 4G та 5G представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця вимог до транспортної інфраструктури для стандартів 4G та 5G

Вимога	Показники для 4G (LTE)	Показники для 5G
Пропускна здатність	10...100 Мбіт/с (середня), до 1 Гбіт/с (пікова)	100 Мбіт/с ...до 10 Гбіт/с
Трафік базової станції	~0,5...2 Гбіт/с	~1...10 Гбіт/с і більше
Затримка (Latency)	30...50 мс	1–10 мс (URLLC до 1 мс)
Jitter (варіація затримки)	$\leq 10 \dots 20$ мс	$\leq 1 \dots 5$ мс
Надійність (Availability)	99,99 %	99,999 %
Час відновлення (Failover)	~100...500 мс	$\leq 50 \dots 100$ мс
Синхронізація (точність часу)	$\pm 1,5$ мкс	до ± 100 нс
Кількість пристроїв	до 10^4 пристроїв/км ²	до $10^5 \dots 10^6$ пристроїв/км ²
Типи сервісів	Переважно стільниковий інтернет (eMBB)	eMBB, URLLC, mMTC
Вимоги до QoS	Пріоритезація трафіку, базові SLA	Гарантована смуга, жорсткі SLA
Масштабованість	Обмежена	Висока, з підтримкою IoT
Енергоефективність	Середня	Висока (оптимізація енергоспоживання)

Аналіз таблиці 1.1 показує, що мережі 5G висувають значно жорсткіші

вимоги до транспортної інфраструктури порівняно з 4G, зокрема щодо пропускної здатності, затримки, точності синхронізації та масштабованості. Це обумовлює необхідність використання високопродуктивних технологій передачі даних, таких як оптичні мережі GPON та їх подальші модифікації (XG-PON, XGS-PON), які здатні забезпечити необхідні параметри для підтримки сучасних мобільних сервісів.

1.2 GPON як фундамент для стільникової транспортної мережі

Технологія GPON стандартизована рекомендаціями Міжнародного союзу електрозв'язку ITU-T серії G.984, які визначають архітектуру мережі, принципи мультиплексування, параметри передачі та вимоги до обладнання. Згідно зі стандартом ITU-T G.984.2, GPON забезпечує швидкість передачі до 2,488 Гбіт/с у напрямку низхідний потік (downstream) та до 1,244 Гбіт/с у напрямку висхідний потік (upstream). Використання різних довжин хвиль (1490 нм для downstream, 1310 нм для upstream) дозволяє реалізувати одночасну двосторонню передачу даних із застосуванням технології WDM [2].

У контексті стільникової транспортної мережі технологія GPON може використовуватися для підключення базових станцій LTE (eNodeB) та 5G (gNodeB) до транспортної мережі. При цьому одна PON-гілка може одночасно обслуговувати як абонентів фіксованого доступу, так і базові станції, що дозволяє реалізувати концепцію конвергенції мереж FMC. Типове навантаження від однієї базової станції може становити від 1 до 5 Гбіт/с, що вимагає ретельного планування розподілу пропускної здатності в межах PON.

Особливістю GPON є використання механізму динамічного розподілу пропускної здатності DBA, описаного в стандарті ITU-T G.984.3 [2]. Цей механізм дозволяє ефективно розподіляти upstream-ресурси між різними ONU, забезпечуючи підтримку різних класів сервісів. Для цього використовуються логічні контейнери T-CONT (Transmission Container), які дозволяють реалізувати різні профілі трафіку, включаючи гарантовану смугу пропускання

для стратегічно важливих сервісів, таких як мобільний трафік.

Разом із тим використання GPON для стільникової транспортної мережі має враховувати обмеження, пов'язані з затримками. Типова затримка в GPON-мережі становить приблизно 1...5 мс, що є прийнятним для 4G, але може бути критичним для деяких сценаріїв 5G, особливо URLLC (див. таблицю 1.1). Додаткові затримки виникають через механізм TDM у напрямку «upstream» та обробку DBA, що потребує оптимізації параметрів конфігурації мережі.

З розглянутого вище, підтримка синхронізації також є необхідною для коректної роботи базових станцій. У цьому контексті GPON повинен забезпечувати передачу синхросигналу з використанням технологій SyncE або IEEE 1588v2 (PTP) [2]. Однак через особливості побудови пасивної мережі та варіації затримок необхідно застосовувати додаткові механізми компенсації для досягнення необхідної точності на рівні ± 100 нс, що вимагається для 5G.

З точки зору надійності GPON має як переваги, так і обмеження. Пасивна природа мережі зменшує кількість активних елементів і, відповідно, потенційних точок відмови, проте використання сплітерів створює ризик впливу відмови на групу користувачів. Для підвищення надійності можуть застосовуватися схеми резервування, зокрема дублювання OLT або використання кільцевих топологій.

З розвитком технологій стандарт GPON поступово доповнюється сучасними рішеннями, такими як XG-PON (ITU-T G.987) із швидкістю до 10 Гбіт/с «downstream» і 2,5 Гбіт/с «upstream», а також XGS-PON (ITU-T G.9807.1), який забезпечує симетричну швидкість 10 Гбіт/с. Ці технології значно краще відповідають вимогам 5G мереж і можуть використовуватися як наступний етап модернізації транспортної інфраструктури.

Отже, технологія GPON, стандартизована рекомендаціями ITU-T, є ефективним і економічно доцільним рішенням для організації стільникової транспортної мережі в умовах конвергенції фіксованих і мобільних мереж. Вона забезпечує достатню пропускну здатність, гнучкість управління

ресурсами та можливість масштабування, проте потребує ретельного проєктування з урахуванням перелічених вище умов для стандарту 4G, а в перспективі і для 5G.

Опрацюємо детальніше інтеграцію фіксованого доступу на базі технології GPON із стільниковими мережами стандарту 4G (LTE).

1.3 Порівняльний аналіз GPON з традиційними методами підключення базових станцій стандарту 4G

У процесі побудови транспортної інфраструктури для мереж стандарту 4G (LTE) застосовуються різні технології підключення базових станцій, серед яких поширеними є радіорелейні лінії (РРЛ), Ethernet-мережі та розглянуті вище пасивні оптичні мережі PON. Кожна з цих технологій має свої особливості, переваги та обмеження, що визначають доцільність їх використання в конкретних умовах.

Радіорелейні лінії традиційно застосовуються для швидкого розгортання мережі, особливо в умовах, де відсутня кабельна інфраструктура. Вони працюють у діапазонах частот 6...42 ГГц, а в деяких сучасних реалізаціях також у E-band (70...80 ГГц), що дозволяє досягати пропускної здатності на рівні 100...500 Мбіт/с, а в окремих випадках – до 1...2 Гбіт/с. Затримка в таких каналах зазвичай становить близько 0,5...2 мс на один проліт є допустимимомою для 4G [4]. Однак якість такої передачі суттєво залежить від погодних умов, зокрема опадів, які можуть спричиняти загасання сигналу, що знижує надійність такого каналу. Крім того, масштабованість РРЛ обмежена, оскільки для збільшення пропускної здатності необхідно використовувати додаткові частотні ресурси або встановлювати нове обладнання.

Ethernet-мережі, особливо ті, що базуються на оптичному волокні, забезпечують значно кращі технічні характеристики. Типові швидкості передачі становлять 1 Гбіт/ або 10 Гбіт/с, що повністю відповідає вимогам 4G і в перспективі частково покриває потреби 5G. Затримка передачі в оптичних

Ethernet-мережах зазвичай не перевищує 1 мс на ділянку, а рівень джиттера є мінімальним. Також такі мережі добре підтримують технології синхронізації, зокрема SyncE та IEEE 1588v2, що дозволяє забезпечити точність на рівні $\pm 1,5$ мкс, необхідну для LTE [4]. Водночас основним недоліком Ethernet-рішень є висока вартість прокладання оптичної інфраструктури, особливо в густонаселених або складних географічних умовах.

На цьому фоні технологія GPON, стандартизована рекомендаціями ITU-T G.984, виступає як компромісне, але ефективне рішення, забезпечуючи гігабітні пропускні швидкості [2]. Це дозволяє обслуговувати як абонентський трафік, так і трафік базових станцій, який згідно таблиці 1.1 становить 0,5...2 Гбіт/с для 4G. Завдяки використанню пасивної оптичної мережі з різними коефіцієнтами розподілу 1:N одна PON-лінія може обслуговувати декілька базових станцій одночасно. При цьому максимальна дальність передачі досягає 20 км, а оптичний бюджет становить до 28...32 дБ залежно від класу встановленого обладнання.

На відміну від Ethernet, у GPON використовується механізм мультиплексування з часовим поділом (TDM), що разом із динамічним розподілом пропускної здатності (DBA) призводить до додаткових затримок. Типова затримка в GPON становить 1...5 мс, а джиттер може досягати 1...5 мс, що є типово для 4G, але потребує оптимізації у випадку переходу до 5G. Що ж стосується синхронізації, GPON може передавати сигнали SyncE та IEEE 1588v2, однак варіації затримок можуть впливати на точність, тому необхідно застосовувати додаткові механізми компенсації [4].

Порівняльний аналіз розглянутих технологій проведемо за розглянутими вище основними вимогами щодо транспортної інфраструктури для стандарту 4G стільникового зв'язку у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння технологій підключення базових станцій стільникового зв'язку до транспортної мережі

Параметр	РРЛ (радіорелейні лінії)	Ethernet (оптика)	GPON (ITU-T G.984)
Тип середовища	Бездротове	Дротове (оптичне)	Пасивна оптична

	(радіоканал)	волокно)	мережа
Частотний діапазон / середовище	6...42 ГГц, 70...80 ГГц (E-band)	Оптичне волокно	Оптичне волокно (PON)
Пропускна здатність	100...500 Мбіт/с (до 2 Гбіт/с)	1...10 Гбіт/с і більше	2,5 Гбіт/с ↓ / 1,25 Гбіт/с ↑
Трафік на базову станцію	До 1...2 Гбіт/с (обмежено)	Повністю підтримується	0,5...2 Гбіт/с (із розподілом)
Затримка	0,5...2 мс	< 1 мс	1...5 мс
Джиттер	Середній (залежить від умов)	Мінімальний	1...5 мс
Надійність	Середня (вплив погоди)	Висока	Висока
Вплив зовнішніх факторів	Високий (дощ, перешкоди)	Відсутній	Відсутній
Синхронізація	Обмежена	Повна (SyncE, IEEE 1588v2)	Підтримується (з компенсацією)
Масштабованість	Обмежена	Висока	Висока (1:32; 1:64)
Дальність	До 10...50 км (з ретрансляцією)	До десятків км	До 20 км
Кількість підключень	Точка-точка	Точка-точка / агрегація	До 32...64 ONU
Вартість розгортання	Низька	Висока	Середня (економія на масштабі)
Час розгортання	Швидкий	Довгий	Середній
Енергоефективність	Середня	Середня	Висока (пасивна мережа)

Аналіз даних таблиці 1.2 свідчить, що радіорелейні лінії є найбільш гнучким і швидким у впровадженні рішенням, однак мають обмежену пропускну здатність і залежать від зовнішніх умов. Ethernet на базі оптичного волокна забезпечує найкращі технічні характеристики, зокрема мінімальні затримки та високу надійність, але потребує значних капітальних витрат на обладнання. Технологія GPON є раціональним компромісом між пропускнуою здатністю, масштабованістю та економічною ефективністю. Це робить її перспективною базою для транспортної інфраструктури мереж 4G з можливістю подальшої адаптації до вимог 5G, що є оптимальним рішенням для сучасної модернізації транспортних мереж.

1.4 Інтеграція GPON та стільникових мереж

Інтеграція фіксованого доступу на базі технології GPON із стільниковими мережами є ключовим елементом розвитку сучасних

телекомунікаційних систем у напрямку конвергенції FMC. Такий підхід дозволяє використовувати єдину транспортну інфраструктуру для обслуговування абонентів фіксованого доступу і базових станцій стільникового зв'язку (eNodeB для 4G).

Як вже було розглянуто вище, технологія GPON стандартизована рекомендаціями ITU-T серії G.984, які визначають архітектуру, параметри передачі та принципи мультиплексування. В перспективі можуть застосовуватися технології XG-PON (ITU-T G.987) та XGS-PON (ITU-T G.9807.1), які забезпечують швидкість до 10 Гбіт/с [4].

Типову архітектуру інтеграції стільникової мережі LTE з транспортною інфраструктурою на базі GPON наведено на рисунку 1.1.

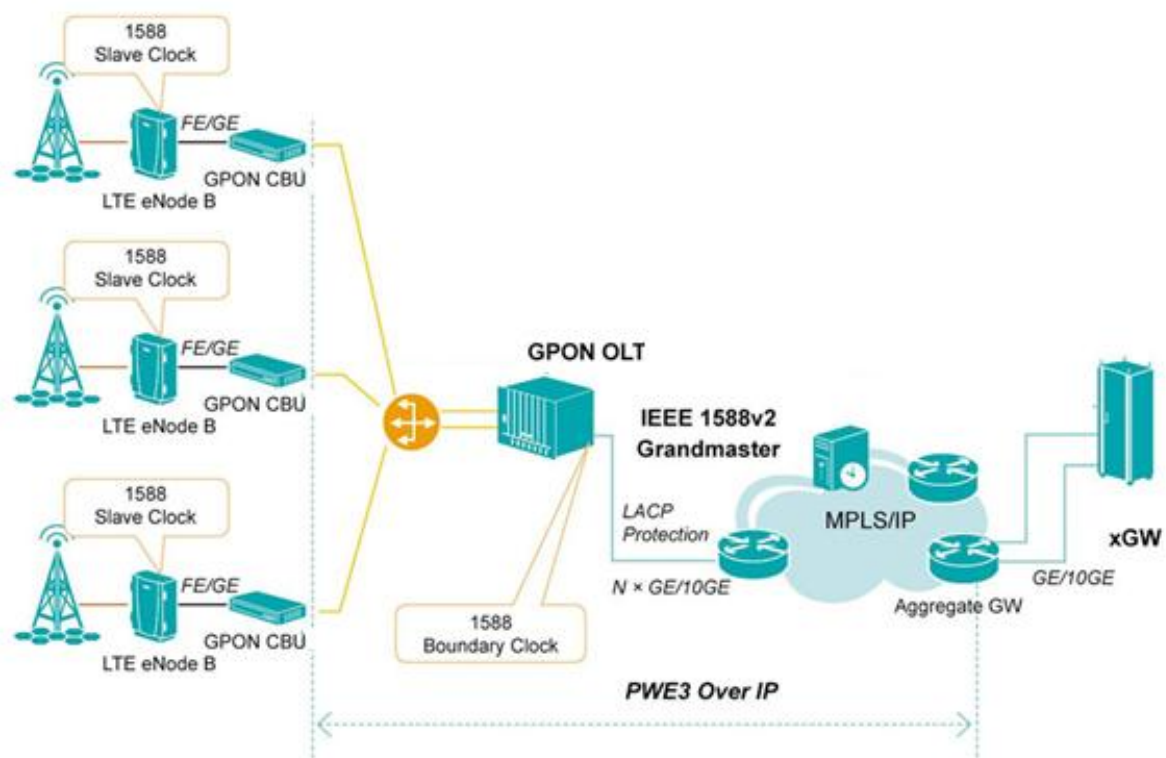


Рисунок 1.1 – Архітектура побудови стільникової транспортної мережі на базі технології GPON [5]

Наведена схема наочно демонструє практичну реалізацію інтеграції GPON із стільниковою мережею, де пасивна оптична інфраструктура використовується як ефективний, масштабований і економічно доцільний транспортний сегмент для обслуговування базових станцій, що повністю

відповідає сучасним вимогам мереж стандарту 4G.

Розглянемо основні складові такої мережі. Базові станції LTE eNodeB виконують функції радіодоступу та обслуговують абонентів. Кожна базова станція підключена до GPON через пристрій CBU або ONU/ONT, який забезпечує перетворення радіотрафіку в оптичний сигнал для передачі по пасивній оптичній мережі.

Особливу увагу на схемі приділено синхронізації: біля кожної базової станції зазначено використання IEEE 1588v2 у режимі «Slave Clock» (ведений годинник). Це означає, що базові станції отримують точний часовий сигнал через транспортну мережу, що важливо для коректної роботи LTE.

В мережі також присутній багатопортовий мережевий пристрій «Boundary Clock» (годинник межі), який виконує роль проміжного вузла синхронізації, зменшуючи вплив джитера та затримок.

Далі трафік від декількох базових станцій агрегується через GPON-мережу і надходить до центрального вузла – GPON OLT. Саме OLT виконує функцію концентрації трафіку та керування доступом у мережі відповідно до стандартів ITU-T G.984. На цьому етапі також може застосовуватись механізм протоколу LACP для об'єднання декількох фізичних каналів у логічний, що підвищує пропускну здатність (зокрема, $N \times \text{GE}/10\text{GE}$).

Після OLT трафік передається в транспортну IP/MPLS-мережу, яка позначена як MPLS/IP. Тут здійснюється маршрутизація, агрегація та передача даних до ядра мережі. На схемі також показано використання технології PWE3, яка дозволяє емулювати традиційні канали передачі поверх IP-мережі, що є важливим для сумісності з попередніми системами.

Фінальним вузлом є агрегуючий шлюз (Aggregate GW) та xGW (SGW/PGW в LTE), які забезпечують взаємодію з ядром стільникової мережі.

З технічної точки зору схема на рисунку 1.1 демонструє такі важливі аспекти інтеграції GPON і стільникових мереж:

- GPON використовується як середовище агрегованого зворотного зв'язку для декількох базових станцій;

- забезпечується передача трафіку на швидкостях рівня 1...10 Гбіт/с через інтерфейси GE/10GE;
- реалізується точна синхронізація через IEEE 1588v2 з використанням «Boundary Clock»;
- використовується багаторівнева транспортна архітектура (GPON → IP/MPLS → Core);
- підтримується масштабованість за протоколом LACP.

Проведений теоретичний аналіз доводить, що технологія GPON є оптимальною архітектурною основою для конвергентних транспортних стільникових мереж. Її впровадження забезпечує раціональний розподіл ресурсів і зниження витрат, зберігаючи при цьому високу якість обслуговування QoS важливих телекомунікаційних сервісів.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ GPON

2.1 Побудова топології мережі: поєднання OLT з ядром стільникової мережі стандарту 4G

Сучасний етап розвитку телекомунікацій характеризується переходом до універсальних архітектур, що здатні одночасно обслуговувати різні типи трафіку. Для розроблення такої інтегрованої мережі пріоритетним завданням є проектування топології, де оптичний лінійний термінал OLT виступає пріоритетним вузлом агрегації між сегментом доступу GPON та магістральною транспортною мережею стільникового оператора. Така конфігурація повністю реалізує концепцію конвергентної інфраструктури, дозволяючи використовувати єдину оптичну платформу для надання послуг фіксованого широкосмугового доступу та забезпечення високошвидкісного підключення базових станцій стандарту 4G. За основу щодо номінальних швидкостей передачі даних прийнято рекомендації ITU-T серії G.984, а також роботу по одному одномодовому волокну з використанням довжин хвиль 1480...1500 нм для «downstream» і відповідно 1290...1330 нм для «upstream» [2].

Топологію інтегрованої мережі, що поєднує GPON (OLT) з ядром стільникової мережі стандарту 4G, відповідно до розглянутої вище (рис. 1.1) архітектури, зображено на рисунку 2.1.

У наведеній топології базові станції стандарту 4G (LTE – eNodeB), підключаються не безпосередньо до магістрального маршрутизатора, а через оптичні термінали CBU, які передають трафік у пасивну оптичну розподільчу мережу ODN. Далі трафік через оптичні сплітери надходить до OLT, а вже з OLT через висхідні інтерфейси GE або 10GE передається в транспортне IP/MPLS-середовище та далі до ядра EPC. Для мережі LTE саме EPC є базовою архітектурою ядра, а взаємодія eNodeB з ядром відбувається через інтерфейси S1-MME для сигнального обміну даними та S1-U для користувацького трафіку.

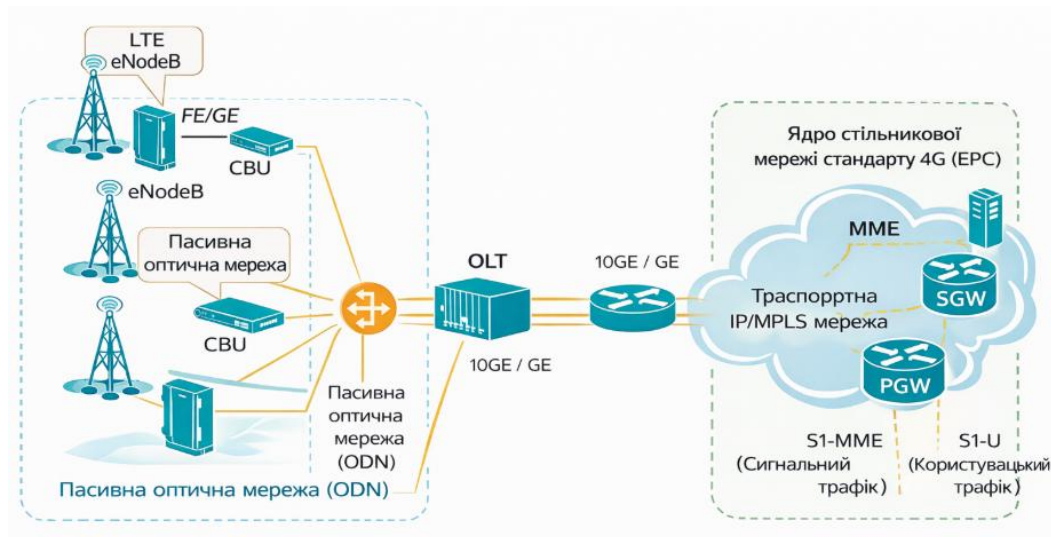


Рисунок 2.1 – Топологія інтегрованої мережі: поєднання GPON (OLT) з ядром стільникової мережі стандарту 4G

Логічно таку топологію можна подати у вигляді такої послідовності: стільникова базова станція eNodeB → термінали CBU → ODN / сплітер → OLT → агрегаційний комутатор/маршрутизатор → IP / MPLS → EPC (MME / SGW / PGW) (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Послідовність топології мережі

Суть цієї побудови полягає в тому, що OLT не виконує функцій мобільного ядра і не обробляє LTE-протоколи на рівні EPC, а є транспортним вузлом агрегації, який збирає Ethernet/IP-трафік від декількох базових станцій і передає його в транспортні мережі. Завдяки цьому GPON-сегмент використовується як рішення для побудови транспортної мережі для 4G, тоді як керування сеансами, мобільністю та виходом у зовнішні пакетні мережі зосереджене в ядрі EPC [5].

З технічної точки зору така схема є доцільною для районів із низькою та середньою щільністю розміщення базових станцій, де важливо зменшити

кількість окремих волокон і одночасно забезпечити достатню пропускну здатність. Під час формування топології мережі необхідно враховувати обмежену ємність висхідного потоку (1,244 Гбіт/с) порівняно з низхідним. Оскільки трафік від базових станцій LTE спрямовується до ядра через «upstream»-канал, правильний розподіл навантаження на один порт GPON стає визначальним фактором для уникнення перевантажень. Для стандарту 4G такий підхід дозволяє підключати декілька базових станцій до одного дерева GPON за умови, що їх сумарне навантаження не перевищує допустимого рівня та для мобільного трафіку виділено пріоритетні ресурси [5].

Важливим елементом представленої топології є механізм розподілу пропускну здатності між вузлами GPON. У стандарті ITU-T G.984.3 описано процедури керування передачею між OLT та CBU, включно з механізмами часової координації, виявлення CBU та регулювання висхідної передачі. Для проєктного рішення це означає, що OLT може централізовано керувати доступом до «upstream»-ресурсу, а мобільний трафік від eNodeB доцільно відносити до сервісів із гарантованою або пріоритетною смугою, щоб зменшити вплив абонентського трафіку (стандартний тип обслуговування для абонентів, що включає перегляд YouTube, завантаження файлів, соцмережі) [5]. Саме тому в інтегрованій схемі OLT до ядра 4G не просто агрегує пакети, а й забезпечує послідовність доступу до транспортного ресурсу (див. рис. 2.2).

З погляду побудови фізичної топології лінійний термінал OLT доцільно встановлювати у вузлі агрегації оператора або в центральному майданчику доступу, де вже присутній вихід до транспортної IP/MPLS-мережі [5]. Від цього вузла до району розміщення стільникових базових станцій прокладається одномодове волокно, після чого через сплітери формується дерево доступу. Такий підхід скорочує капітальні витрати порівняно з виділенням волокном до кожної базової станції. GPON підтримує поділ до 1:64 і дальність близько 20 км, що робить таку топологію ефективною для міських і приміських зон.

Враховуємо також, що для 4G-транспортної мережі важлива не лише

пропускна здатність, а й коректна доставка сигнального трафіку. Тому між OLT і ядром стільникової мережі доцільно застосовувати рівень агрегації з підтримкою VLAN, QoS і резервування «uplink»-каналів. Тобто після OLT бажано встановлювати агрегаційний комутатор або маршрутизатор, який виділяє окремі логічні канали під S1-U і S1-MME, забезпечує пріоритезацію трафіку та передає його в EPC без конкуренції з сервісами, що не мають суворих вимог до часових затримок. Саме така дворівнева модель «OLT як вузол доступу + IP/MPLS як транспортна мережа» є найбільш раціональною для 4G [5].

Підсумовуючи вище викладений матеріал можна відмітити, що поєднання OLT з ядром стільникової мережі стандарту 4G слід розглядати як ієрархічну топологію, де GPON забезпечує транспортний сегмент мережі доступу, OLT виконує агрегацію і керування передаванням даних у межах PON, а транспортна IP/MPLS-мережа з'єднує цей вузол із EPC. Таке рішення є технічно обґрунтованим, оскільки поєднує достатню пропускну здатність GPON, централізоване керування ресурсом і сумісність із класичною архітектурою LTE/EPC.

2.2 Розрахунок параметрів якості обслуговування для пріоритезації голосового та сигнального трафіку базових станцій 4G

2.2.1 Параметри, що характеризують якість обслуговування QoS

У процесі інтеграції GPON із стільниковими мережами стандарту 4G одним із необхідних завдань, як було визначено у першому розділі роботи, є забезпечення якості обслуговування QoS для різних типів трафіку. Особливу увагу необхідно приділити голосовому VoLTE та сигнальному трафікам, оскільки вони мають жорсткі вимоги до затримки та втрат пакетів.

«У мережах LTE голосовий трафік передається у вигляді пакетів IP (VoLTE) і характеризується невеликим обсягом, але високою чутливістю до затримок. Типові параметри для голосового трафіку становлять: швидкість

одного голосового потоку – 12...64 кбіт/с, допустима затримка – не більше 150 мс, джиттер – не більше 20...30 мс, а рівень втрат пакетів – не вище 1%. Сигнальний трафік (S1-MME) має ще менший обсяг, але вимагає мінімальних затримок (порядку 50...100 мс) і високої надійності передачі» [5].

Для GPON-мережі передача даних здійснюється за допомогою механізму TDM у висхідному (upstream) напрямку та широкомовної передачі у низхідному. Це означає, що всі CBU ділять спільний upstream-канал із пропускною здатністю 1,244 Гбіт/с. Для забезпечення QoS використовується механізм DBA, який дозволяє динамічно розподіляти пропускну здатність між різними типами трафіку [5].

Для реалізації пріоритезації вводиться поділ трафіку на класи. У проєктованій мережі доцільно виділити щонайменше три класи характеристики яких розглянуті вище:

- клас високого пріоритету – сигнальний трафік (S1-MME);
- клас гарантованого обслуговування – голосовий трафік (VoLTE);
- клас «best-effort» (з докладанням максимум зусиль) – абонентський інтернет-трафік.

«Сигнальний трафік доцільно обслуговувати за схемою з фіксованою пропускною здатністю (T-CONT тип 1), що гарантує мінімальні затримки. Голосовий трафік може передаватися з використанням гарантованої смуги (T-CONT тип 2 або 3), а інші сервіси – за залишковим принципом (T-CONT тип 4)» [4].

Подальші розрахунки проводимо на базі обладнання Huawei. Для розрахунку параметрів QoS у мережах 4G на базі обладнання Huawei (серії eNodeB та OLT) необхідно враховувати механізм QCI (ідентифікатор класу QoS), оскільки GPON пріоритезація відбувається на двох рівнях: у пакетному ядрі (EPC) та на рівні GPON-інфраструктури (через T-CONT та GEM Ports).

Для базових станцій 4G за вимогами 3GPP (для Huawei eNodeB) виділяємо три типи трафіку, характеристики яких наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація трафіку згідно з вимогами 3GPP

Тип трафіку	QCI	Пріоритет (Huawei DSCP)	Допустима затримка (Latency)	Втрата пакетів (PELR)
Сигналізація (S1-C)	-	CS6 / DSCP 48	< 100 мс	10^{-6}
Голос (VoLTE)	1	EF / DSCP 46	< 50 мс	10^{-2}
Відеодзвінки	2	AF41 / DSCP 34	< 150 мс	10^{-3}

2.2.2 Розрахунок смуги пропускання для голосового та сигнального трафіку

Стандарт 4G дозволяє операторам використовувати різні смуги частот. «Кількість викликів залежить від кількості доступних ресурсних блоків (PRB) :

- 20 МГц (місто): типова ємність становить 400...600 одночасних дзвінків на сектор;
- 10 МГц (приміська зона): ємність складає близько 200...300 дзвінків;
- 5 МГц (село/траса): сота підтримує до 100...150 дзвінків» [6].

Для розрахунку приймаємо, що одна базова станція знаходиться у приміській зоні та обслуговує до 400 одночасних VoLTE-викликів. Відповідно за середньої швидкості одного потоку 42 кбіт/с сумарний трафік становитиме:

$$T_{\text{VoLTE}} = 400 \cdot 42 = 16800 \text{ кбіт / с} = 16,8 \text{ Мбіт / с}.$$

З урахуванням службових заголовків (IP / UDP / RTP), які додають ще (20...30) % навантаження, отримаємо:

$$T_{\text{VoLTE+сл.}} = 16,8 \cdot 1,3 = 21,84 \text{ Мбіт / с}.$$

Таким чином, для однієї базової станції необхідно резервувати орієнтовно 22 Мбіт/с для голосового трафіку.

Сигнальний трафік значно менший за обсягом. Навіть при активному навантаженні він зазвичай не перевищує $T_{\text{сигн.}} = 2 \text{ Мбіт/с}$ на базову станцію. Однак через критичність до затримок для нього необхідно забезпечити гарантований канал із мінімальними чергами.

2.2.3 Розрахунок смуги пропускання для відеодзвінків (ViLTE)

Для розрахунку підтримки відеодзвінків через LTE параметри мережі

мають бути значно вищими, оскільки відео трафік є не лише чутливим до затримок, але й дуже вимогливим до смуги пропускання та об'єму пакетів.

Для мережі 4G під час організації відеодзвінків доцільно враховувати, що один абонентський сеанс HD-якості 720p з використанням кодеків H.264 або HEVC потребує в середньому близько 2...5 Мбіт/с. У роботі для розрахунків прийнято максимальне значення 5 Мбіт/с на одну сесію. Для 50 одночасних відеосеансах сумарна корисна смуга пропускання становить:

$$T_{ViLTE} = 50 \cdot 5 = 250 \text{ Мбіт / с.}$$

З урахуванням службових заголовків протоколів IP / UDP / RTP, сигнального супроводу та пульсацій трафіку відеопотоку додатково закладається запас 20 %, унаслідок чого повна необхідна смуга пропускання буде рівною:

$$T_{ViLTE+зап} = 250 \cdot 1,2 = 300 \text{ Мбіт / с.}$$

Отже, для забезпечення стабільної передачі відеотрафіку в транспортному сегменті GPON доцільно прийняти в роботі такі значення параметрів якості обслуговування: CIR – гарантована смуга становить 250 Мбіт/с, PIR – пікова смуга становить 300 Мбіт/с. Наведені швидкості дозволяють гарантувати обслуговування основного відеотрафіку та забезпечити резерв під час короткочасних коливань навантаження.

2.2.4 Розподіл ресурсів у PON мережі

Для забезпечення відеотрафіку (ViLTE) необхідно виділити 300 Мбіт/с під одну базову станцію (лише для відео) стандартного GPON порту . У проєктованій мережі передбачається підключення трьох базових станцій до одного GPON-дерева. У такому випадку сумарне навантаження відеотрафіку становитиме:

$$T_{\sum ViLTE+зап} = 300 \cdot 3 = 900 \text{ Мбіт / с.}$$

Для загальної висхідної пропускну здатності 1,244 Гбіт/с і підключенні, відповідно до рисунка 2.1, трьох базових станцій, сумарне навантаження становитиме:

- для голосового трафіку: 22...66 Мбіт/с;
- для сигнального трафіку: до 6 Мбіт/с;
- для користувацького трафіку: за залишковим принципом.

Для забезпечення QoS доцільно виділити:

- (5...10) % – під голосовий трафік,
- (1...2) % каналу – під сигнальний трафік,
- залишок – для користувацького трафіку.

Перевірка на доступну пропускну здатність GPON мережі для висхідного каналу виконується:

$$1244 \text{ Мбіт / с} \geq (900 + 66 + 6) = 972 \text{ Мбіт / с}.$$

Розрахунки підтвердили здатність GPON-мережі забезпечити пропускну здатність для трьох базових станцій (відео, голос, сигналізація). У висхідному каналі обсяг трафіку 300 Мбіт/с дозволяє обслужити 50 сесій, зберігаючи резерв у розмірі:

$$T_{\text{резерв}} = 1244 - 972 = 272 \text{ Мбіт / с}.$$

Отриманий резерв пропускну здатності може бути використаний для:

- пікових навантажень відеотрафіку,
- зростання в перспективі кількості абонентів,
- передачі додаткових сервісів.

Топологія мережі на базі GPON для підключення 3 базових станцій 4G з підтримкою відеотрафіку наведена на рисунку 2.2.

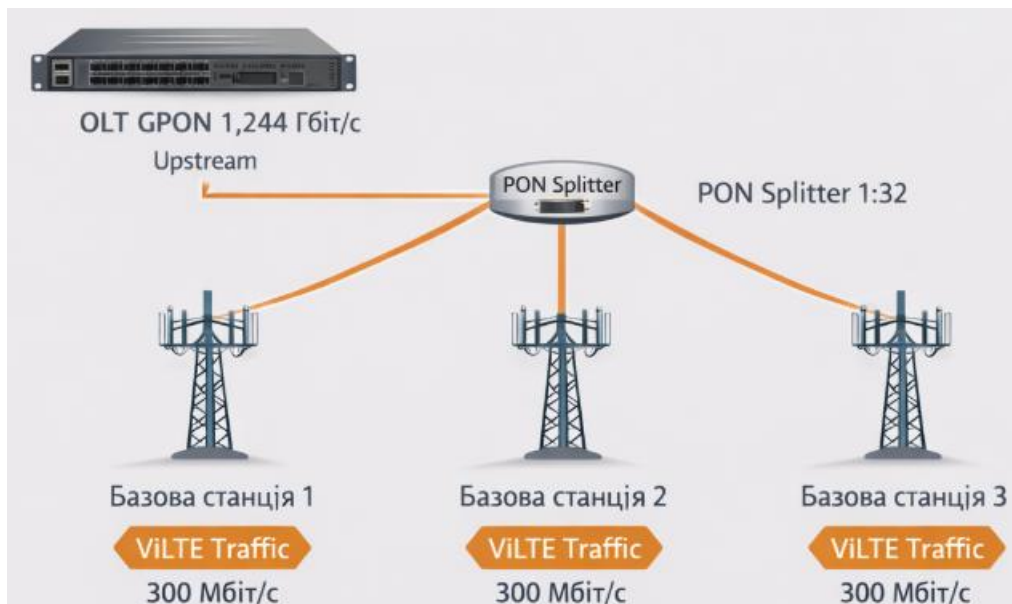


Рисунок 2.2 – Топологія мережі на базі GPON для підключення трьох базових станцій 4G з підтримкою відеотрафіку

2.2.5 Забезпечення затримки та джиттер

Затримка в GPON формується з декількох складових [5]:

- передача в оптичному волокні (орієнтовно 5 мкс/км);
- обробка в терміналах CBU/OLT;
- затримка через DBA, яка виникає через процес динамічного розподілу смуги пропускання між абонентськими терміналами.

Для максимальної довжини лінії у 20 км затримка становитиме:

$$t_{\text{затр.}} = 20 \cdot 5 = 100 \text{ мкс} = 0,1 \text{ мс.}$$

Для стабільної роботи 4G мережі джиттер у транспортному каналі не повинен перевищувати 10...20 мс. З урахуванням обробки загальна затримка GPON становить приблизно 1...5 мс, що відповідає вимогам 4G [5].

Якщо виникає потреба для зменшення джиттера застосовуються додаткові заходи, зокрема:

- пріоритетні черги;
- обмеження буферизації;
- виділення гарантованих слотів у DBA.

Проведений аналіз розрахунків показує, що використання технології

GPON є технічно обґрунтованим рішенням для побудови транспортної мережі стандарту 4G, що дозволяє:

- забезпечити необхідний рівень QoS для всіх типів трафіку;
- ефективно використовувати ресурси оптичної інфраструктури;
- уникнути необхідності переходу на дорожчі технології на початковому етапі.

При подальшому зростанні відеотрафіку або збільшенні кількості базових станцій може виникнути потреба у переході до технологій наступного покоління, зокрема XG-PON.

2.3 Резервування каналів у GPON-мережі

Для забезпечення безперервності роботи стільникової мережі стандарту 4G необхідно передбачити механізми резервування транспортної інфраструктури, тому що базові станції передають трафік (сигнальний та голосовий) і навіть короткочасна втрата зв'язку може призвести до деградації сервісів або втрати з'єднання. Для мереж GPON застосовуються стандартизовані схеми резервування, визначені ITU-T, серед поширених є Type B та Type C, порівняння яких наведено у таблиці 2.2 [4].

Таблиця 2.2 – Основні параметри схем резервування Type B / Type C у PON-мережах

Параметр	Type B (Dual-homing)	Type C
Тип резервування	Часткове	Повне
Резервується	OLT та магістральне волокно	OLT, волокно та порти на самому терміналі
Кількість OLT	1 основний + 1 резервний	2 (незалежні)
Кількість CBU	1	2 (або подвійне самонаведення)
Сплітер	Один або два	Два (обов'язково 2 : N)
Оптичні тракти	1	2 незалежні
Розподільчий кабель	Не захищений (точка відмови)	Захищений (від сплітера до CBU)
Час перемикання	50...100 мс	≤ 50 мс
Відповідність операторського класу	Частково	Повністю
Складність реалізації	Проста в налаштуванні	Висока (вимагає подвійної інфраструктури)

Вартість впровадження	Нижча	Висока
-----------------------	-------	--------

За таблицею 2.2 варіанту резервування Type B цілком достатньо для роботи трьох базових станцій. До того ж Type B – галузевий стандарт для підключення базових станцій, який забезпечує високу надійність без зайвих витрат на прокладання дублюючих ліній до кожної базової. Якщо один OLT вимкнеться на обслуговування, трафік від усіх трьох базових станцій миттєво переключиться на другий OLT. Схема резервування GPON-мережі для обслуговування базових станцій стільникового зв'язку наведена на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Схеми резервування GPON-мережі для обслуговування базових станцій стільникового зв'язку Type B

2.4 Розрахунок оптичного бюджету траси від вузла агрегації до віддалених модулів базових станцій

Розрахунок оптичного бюджету GPON-мережі для підключення базових станцій 4G дозволяє визначити, чи забезпечується достатній рівень оптичної потужності сигналу для стабільної роботи обладнання на всій довжині траси.

Вихідні дані для розрахунку наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вихідні дані для розрахунку оптичного бюджету

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Довжина оптичної лінії	L	км	20
Будівельна довжина оптичного кабелю	L_{OK}	км	2
Загасання волокна	α	дБ/км	0,35
Кількість зварних з'єднань	N_{splice}	шт	10
Втрати на одне зварне з'єднання	A_{splice}	дБ	0,1
Кількість конекторів	N_{conn}	шт	4
Втрати на один конектор	A_{conn}	дБ	0,5
Тип оптичного сплітера	—	—	1×4
Втрати на сплітері	$A_{splitter}$	дБ	7,4

Розрахунки виконуємо за методикою, наведеною в [7] відповідно до схеми, представленої на рисунку 2.3.

Для стандарту GPON (ITU-T G.984, клас B+) типовий оптичний бюджет становить 28 дБ, який і приймаємо для розрахунку [2].

Розрахункова формула для визначення оптичний бюджету згідно [7] має вигляд:

$$A_x = L_{OK} \cdot \alpha + N_{conn} \cdot A_{conn} + N_{splice} \cdot A_{splice} + A_{\sum splitter}, \quad (2.1)$$

де « L_{OK} – довжина лінії від базової станції до оптичного сплітера каскаду;

α – коефіцієнт загасання на розрахунковій довжині хвилі;

N_{conn} – кількість роз'ємних з'єднань на ділянці x ;

A_{conn} – загасання одного роз'ємного з'єднання;

N_{splice} – кількість зварних з'єднань на ділянці x ;

A_{splice} – загасання одного зварного з'єднання;

$A_{\sum splitter}$ – сумарне загасання на каскаді сплітерів» [7].

Підставивши дані таблиці 2.3 у формулу 2.1 отримаємо:

$$A_x = 20 \cdot 0,35 + 4 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,1 + 1 \cdot 7,4 = 17,4 \text{ дБ}.$$

Перевірка відповідності оптичному бюджету з врахуванням мінімально-допустимого запасу у 3 дБ:

$$A_{\text{розр.}} = 28 - 17,4 - 3 = 7,6 \text{ дБ.}$$

Результати розрахунку показують, що розроблена GPON-мережа забезпечує необхідний рівень оптичної потужності для підключення базових станцій 4G. Отриманий запас бюджету є достатнім для надійної роботи системи та дозволяє врахувати експлуатаційні фактори. Розрахована оптична траса від вузла агрегації до віддалених модулів базових станцій наведена на рисунку 2.4.

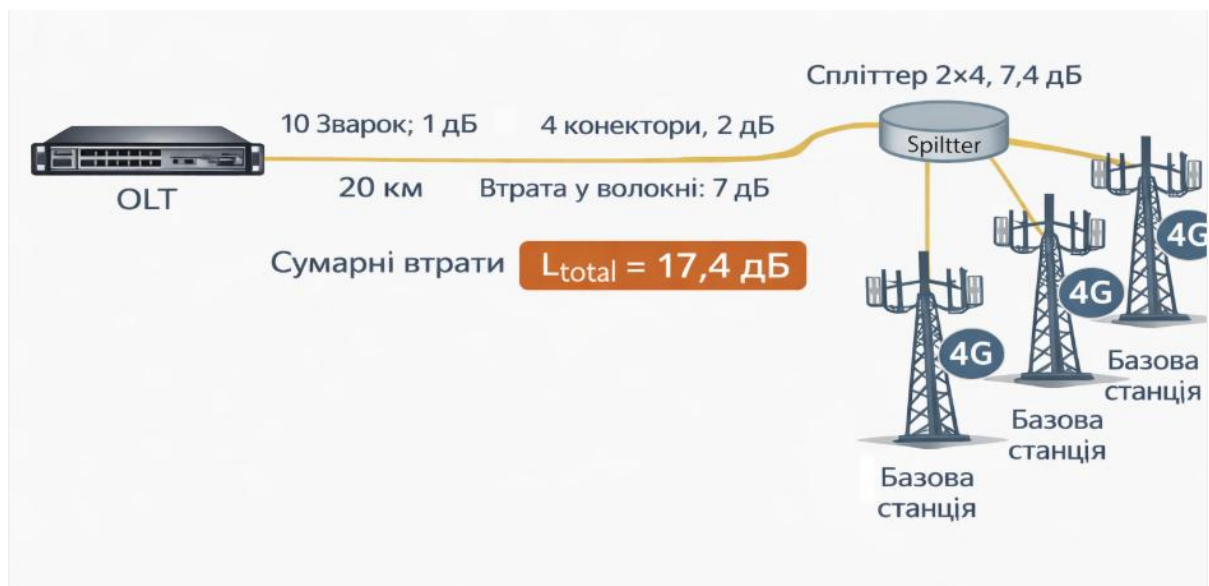


Рисунок 2.4 – Оптична траса від вузла агрегації OLT до віддалених модулів базових станцій стільникового зв'язку

Обрана топологія та параметри лінії відповідають вимогам стандарту GPON і можуть бути використані для побудови транспортної мережі стільникового зв'язку.

2.5 Функціональна схема із резервуванням за технологією GPON для стільникової мережі

Відповідно до проведених у 2 розділі обчислень та прийнятих рішень отримали функціональну схему із резервуванням (Type B) за технологією GPON для стільникової мережі (рисунок 2.5).

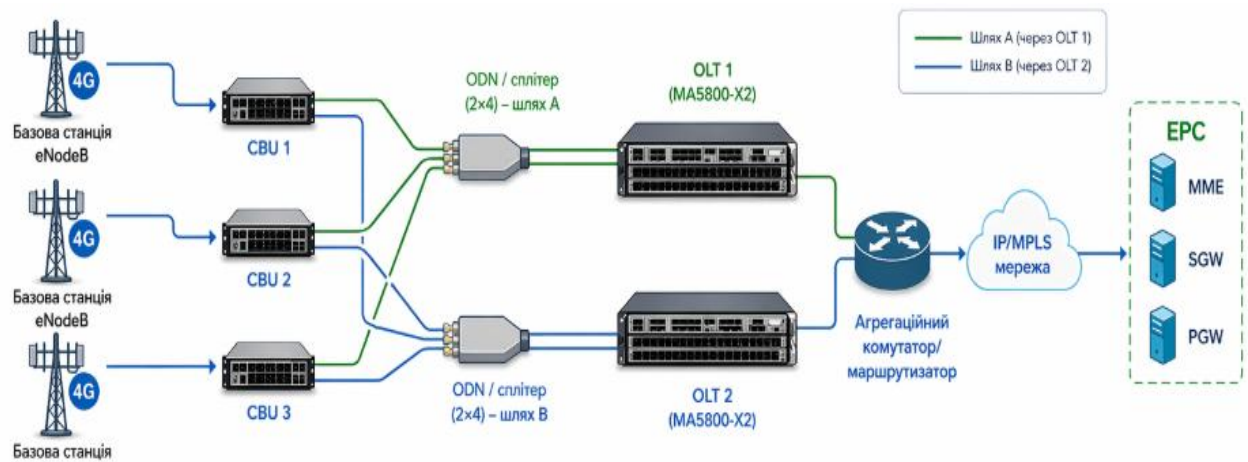


Рисунок 2.5 – Функціональна схема із резервуванням за технологією GPON для транспортної стільникової мережі

Обрана конфігурація мережі забезпечує необхідний рівень надійності, пропускної здатності та масштабованості мережі, а також повністю відповідає вимогам сучасних операторських систем стільникового зв'язку.

2.6 Вибір телекомунікаційного обладнання для побудови транспортної GPON мережі

2.6.1 Вибір оптичного лінійного терміналу OLT

Вибір телекомунікаційного обладнання для побудови стільникової транспортної мережі на базі технології GPON здійснюється з урахуванням вимог до пропускної здатності, надійності, масштабованості та сумісності з існуючою інфраструктурою стільникового оператора.

В якості оптичного лінійного терміналу (OLT) обираємо Huawei MA5800-X2 [8]. Дане рішення є сучасною платформою операторського рівня, яка підтримує високу щільність портів, гнучку масштабованість та інтеграцію з транспортними мережами. Основною перевагою є підтримка механізму Dual-Parenting, що дозволяє реалізувати резервування на рівні OLT та забезпечити показники доступності мережі на рівні 99,999 %. У роботі передбачено використання двох OLT для обраної схеми резервування Type B.

2.6.2 Вибір оптичного терміналу для транспортної мережі CBU

Для підключення базових станцій використовуємо термінали Huawei OptiXstar T823E-G, які виконують роль CBU у транспортній мережі [9]. Обрані пристрої підтримують стандарт GPON (ITU-T G.984 / 1588 v2), що забезпечує синхронізацію в стільникових мережах 4G. Наявність двох оптичних інтерфейсів дозволяє реалізувати резервування каналів (для обраного типу резервування Type B), що значно підвищує відмовостійкість.

2.6.3 Вибір оптичного кабелю транспортної мережі

Як середовище передачі використовуємо одномодовий оптичний кабель стандарту G.652D SMF. Даний тип волокна характеризується низьким коефіцієнтом згасання (близько 0,35 дБ/км) та високою стабільністю параметрів на великих відстанях. Загальна довжина траси у роботі становить до 20 км, що відповідає допустимим параметрам GPON та не потребує використання додаткових підсилювачів сигналу [4].

2.6.4 Вибір оптичних сплітерів

Для розгалуження сигналу використовується PLC-сплітер типу 2:4, який підтримує схеми резервування завдяки наявності двох вхідних портів. Це дозволяє організувати підключення терміналів як до основного, так і до резервного OLT та забезпечує можливість підключення ще одного терміналу CBU на перспективу.

Телекомунікаційне обладнання для побудови стільникової транспортної GPON-мережі згідно прийнятих у роботі рішень представлено у таблиці 2.4 .

Таблиця 2.4 – Телекомунікаційне обладнання для побудови стільникової транспортної GPON-мережі

Компонент	Модель/марка	Кількість	Обґрунтування
OLT	Huawei MA5800-X2	2	Підтримка Dual-Parenting
CBU	Huawei OptiXstar T823E-G	3	Професійні термінали з підтримкою 1588v2 та двома оптичними входами
Спліттер	PLC 2×4	1 (або 2)	Спліттери з двома входами (2:N) для з'єднання з основним та резервним

Кабель	G.652D SMF	~20 км	OLT
			Оптимальне волокно для магістралей в Україні (низьке затухання)

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АДАПТАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ GPON ДО ВИМОГ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ

3.1 Характеристика оптичного лінійного терміналу Huawei MA5800-X2

Опрацюємо технічні характеристики складових розробленої функціональної схеми для ділянки OLT – базова станція згідно рисунка 2.5.

Для встановлення в OLT прийнято модульний оптичний термінал Huawei MA5800-X2. Для операторів стільникового зв'язку він виконує роль ключового вузла в архітектурі транспортної мережі для базових станцій. Загальний вигляд терміналу, основні блоки та інтерфейси зображено на рисунку 3.1.

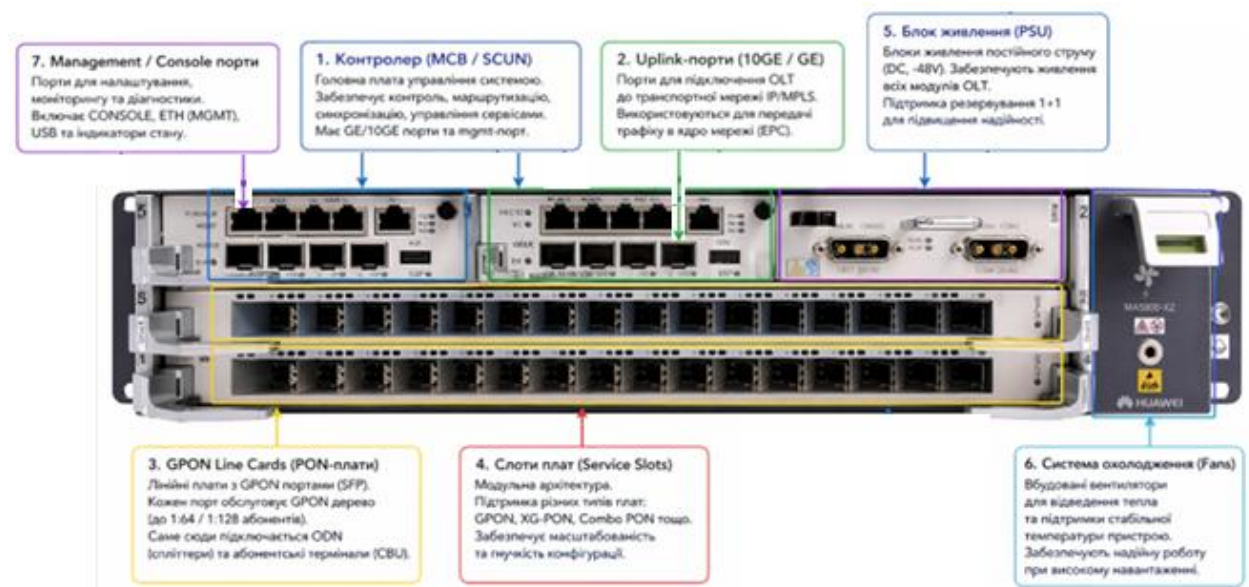


Рисунок 3.1 – GPON термінал Huawei MA5800-X2, основні блоки та інтерфейси [8]

Прийняті позначення на рисунку 3.1:

1 – Контролер роботи системи (MCB / SCUN). Забезпечує контроль,

маршрутизацію, синхронізацію, управління сервісами.

2 – Uplink-порти (GE / 10GE) для підключення OLT до транспортної мережі IP/MPLS, забезпечуючи передачу трафіку в ядро мережі (EPC).

3 – GPON-порти (SFP) для підключення сплітерів та оптичних терміналів (CBU).

4 – Слоти сервісних плат GPBF з підтримкою GPON, XG-PON.

5 – Блок живлення PISB всіх модулів терміналу з підтримкою резервування за схемою 1+1.

6 – Система повітряного охолодження на вентиляторах.

7 – Порти для налаштування моніторингу та діагностики роботи OLT (management).

Технічні характеристики оптичного терміналу OLT Huawei MA5800-X2 наведені у таблиці 3.1 відповідно до [8].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики оптичного терміналу OLT Huawei MA5800-X2

Характеристика	Опис / Параметр
1	2
Комутаційна спроможність плати управління	480 Gbit/s
Максимальна пропускна здатність на слот	80 Gbit/s
Інтерфейси	2 слоти для сервісних плат; 2 слоти для керуючих плат; 1 слот для плат електроживлення (AC / DC)
Технологія роботи:	GPON, XG-PON, XGS-PON
Кількість портів PON	до 32
Макс. кількість XG-PON/XGS-PON	16
Макс. кількість GE/FE	96
Управління	Telnet; SSH; LLDP; SNMP v1/v2/v3; Syslog; NTP
Uplink порти (на платі управління)	4*GE + 4*10GE/GE
Канальний рівень Layer 2	VLAN+MAC forwarding SVLAN+CVLAN forwarding PPPoE+ DHCP option82
Канальний рівень Layer 3	Static route RIP / RIPng OSPF / OSPFv3 IS-IS BGP / BGP4+ ARP

	DHCP relay
--	------------

Продовження таблиці 3.1

1	2
Multicast (багатоадресна розсилка)	IGMP v2 /v3 IGMP Proxy / Snooping MLD v1 / v2 MLD Proxy / Snooping VLAN-based IPTV multicast
QoS (якість обслуговування)	Класифікація трафіку Пріоритетне оброблення Контроль трафіку на основі trTCM WRED Формування трафіку HQoS PQ / WRR / PQ+WRR ACL
Максимальна кількість MAC-адрес:	262,143
Максимальна кількість ARP	131,072
Кількість одночасних користувачів відео 4K	2000
Номінальна напруга	DC: -48 V/-60 V AC: 110 V/220 V
Температурний режим	-40...65 °C
Вага	9,4 кг
Розміри	442 мм x 268,7 мм x 88,1 мм (можливість монтажу в 19" стійку, 2U)

Висока комутаційна спроможність OLT на рівні 480 Гбіт/с забезпечує одночасну обробку трафіку від декількох базових станцій без виникнення перевантажень, що є важливим при збільшенні кількості абонентів і навантаження в мережі стільникового оператора. Завдяки цьому навіть за пікових навантажень, передача даних між базовими станціями та ядром мережі відбувається стабільно.

Наявність до 32 PON-портів дозволяє підключати значну кількість базових станцій через CBU, що робить рішення масштабованим і придатним для розширення мережі без необхідності заміни обладнання. При цьому кожна базова станція може бути підключена за схемою резервування Type C, використовуючи два незалежні оптичні шляхи до різних OLT, що значно підвищує надійність зв'язку.

Uplink-інтерфейси 10 Гбіт/с забезпечують швидкісне підключення OLT до транспортної IP / MPLS мережі оператора, через яку трафік від базових станцій передається до ядра мережі EPC (MME, SGW, PGW). Це гарантує мінімальні затримки та достатню пропускну здатність для обслуговування сервісів LTE, зокрема VoLTE та мобільного інтернету.

Підтримка функцій QoS дозволяє пріоритезувати трафік від базових станцій, зокрема виділяти ресурси для важливого сигнального трафіку та сервісів реального часу, що актуально для забезпечення стабільної роботи голосових викликів і відеозв'язку в мережах 4G.

Реалізація функцій рівня Layer 2 та Layer 3 забезпечує ефективну маршрутизацію та сегментацію трафіку від різних базових станцій, та дозволяє ізолювати потоки даних і підвищити безпеку та керованість мережі.

Завдяки підтримці резервування керуючих плат та живлення, а також широкому температурному діапазону роботи, OLT може стабільно функціонувати навіть у складних умовах експлуатації, що характерно для вузлів стільникового зв'язку.

3.2 Вибір SFP трансиверів

Для забезпечення роботи оптичного терміналу Huawei MA5800-X2 у складі транспортної GPON мережі для підключення стільникових базових станцій 4G необхідно підібрати оптичні SFP-трансивери, які виконують дві ключові функції: підключення абонентських вузлів (CBU) через GPON та організацію uplink-з'єднання з транспортною IP / MPLS мережею оператора.

Для реалізації доступу до базових станцій використовується GPON SFP-модуль, який встановлюється у PON-порти OLT. За результатом проведених розрахунків оптичного бюджету сумарні втрати становлять 17,4 дБ, тому доцільно застосовувати трансивери класу GPON Class C+. Такі модулі забезпечують оптичний бюджет на рівні 30 дБ, що створює додатково запас потужності для стабільної роботи мережі навіть з урахуванням можливих

додаткових втрат у з'єднаннях, старіння волокна або розширення мережі. За [10] обираємо SFP-модуль Huawei GPON OLT CLASS C+ Huawei (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – SFP-модуль Huawei GPON OLT CLASS C+ Huawei [10]

Робочі довжини хвиль для GPON становлять 1490 нм для низхідного потоку та 1310 нм для висхідного, що відповідає стандарту та забезпечує сумісність із терміналами CBU, встановленими на стільникових базових станціях. Вибраний SFP-модуль HUAWEI дає можливість реалізації резервування за схемою Type B із двома незалежними оптичними шляхами.

Для організації транспортного рівня мережі, тобто передачі агрегованого трафіку від базових станцій до ядра мобільної мережі (EPC) (див. рис. 2.5), застосовуються високошвидкісні SFP+ трансивери. У Huawei MA5800-X2 для цього передбачені uplink-порти з підтримкою інтерфейсів 10 Гбіт/с. Оптимальним вибором є використання модулів типу 10G SFP+ з довжиною хвилі 1310 нм та дальністю передачі до 20 км по одномодовому волокну (SMF). Такі модулі забезпечують пропускну здатність на рівні 10 біт/с, що значно перевищує поточні потреби мережі (близько 1 Гбіт/с сумарного трафіку від базових станцій), і водночас створює запас для подальшого зростання навантаження. За [10] обираємо Huawei SFP-10G-BXD1 (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Модуль Huawei SFP-10G-BXD1 [10]

Використання 10G SFP+ модуля дозволяє реалізувати резервовані uplink-з'єднання між OLT та агрегаційним маршрутизатором IP/MPLS мережі для забезпечення безперервності роботи стільникового зв'язку у випадку відмови одного з каналів.

3.3 Характеристика оптичного терміналу базової станції

Оптичний мережевий термінал BCU марки Huawei OptiXstar T823E-G виконує роль кінцевого вузла доступу, який встановлюється безпосередньо на стороні стільникової базової станції (eNode B) та забезпечує перетворення оптичного сигналу GPON у електричні інтерфейси для передачі трафіку.



Рисунок 3.5 – Оптичний мережевий термінал Huawei OptiXstar T823E-G [9]

Технічні характеристики оптичного мережевого терміналу Huawei OptiXstar T823E-G наведені у таблиці 3.2 за [9].

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики оптичного мережевого терміналу Huawei OptiXstar T823E-G

Характеристика	Опис / Параметр
Мережевий інтерфейс	Вхід 2 × GPON (SFP слоти); вихід 8 × GE (RJ-45)
Швидкість передачі (GPON)	Прийом: 2,488 Гбіт/с; передача: 1,244 Гбіт/с
Резервування лінії	Підтримка Type B / Type C
Функції рівня Layer 2	VLAN, QoS, Multicast
Живлення та PoE	54...57V DC
Робоча вологість	5 % ... 95 % (без конденсації)
Робоча температура	від -40°C до +70°C
Розміри (В x Ш x Г)	43,6 мм × 250 мм × 180 мм (можливість монтажу в 19" стійку, 1U)
Вага	~ 1,5 кг

Аналіз таблиці 3.2 показує, що на виході термінал має 8 гігабітних Ethernet-портів (GE), через які підключається обладнання eNode B, а також допоміжні системи. Така кількість портів дозволяє гнучко організувати підключення як основного радіообладнання стільникового зв'язку, так і сервісних вузлів

Швидкість передачі даних у GPON-мережі повністю відповідає вимогам транспортної мережі 4G. З урахуванням того, що одна базова станція генерує близько 300 Мбіт/с трафіку, вибраний термінал забезпечує необхідний запас пропускної здатності для стабільної роботи та подальшого масштабування мережі.

На каналному рівні пристрій підтримує функції VLAN, QoS та Multicast, що дозволяє ефективно сегментувати трафік базових станцій, пріоритезувати всі важливі потоки (наприклад, сигнальний трафік LTE) та оптимізувати передачу мультимедійних сервісів. Це безпосередньо впливає на якість обслуговування абонентів стільникової мережі.

3.4 Вибір оптичних кабелів

3.4.1 Магістральна ділянка

За рекомендаціями ITU-T G.983 [3], для побудови PON мережі застосовуємо кабелі з одномодовими оптичними волокнами стандарту G.652D, які забезпечують низьке затухання сигналу. Для перспективного розширення мережі вибираємо кабель на 12 волокон, а враховуючи умови прокладання у ґрунті – броньований. За [11] вибираємо одномодовий оптичний кабель марки ОКТБг-М (2,7)П-12Е1-0,40Ф3,5/0,30Н19-12 (рис. 3.6). ОКТБг – це оптичний кабель броньований гофрованою сталевною стрічкою.



Рисунок 3.6 – Оптичний кабель марки ОКТБГ-М (2,7)П-12Е1 [11]

Технічні характеристики оптичного кабелю ОКТБГ-М (2,7)П-12Е1-0,40Ф3,5/0,30Н19-12 виробництва заводу «Одескабель» представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики оптичного кабелю ОКТБГ-М (2,7)П-12Е1

Параметр	Значення / Розшифрування
Допустиме розтягуюче зусилля	2,7 кН
Допустиме роздавлююче зусилля	3 кН / 100 мм
Тип центрального силового елемента	П – діелектричний (склопластиковий пруток)
Загальна кількість волокон	12
Тип оптичного волокна	Е1 – одномодове волокно (стандарт G.652.D)
Коефіцієнт згасання (1310 / 1550 нм)	0,35 / 0,22 дБ/км
Тип броні	Ф – сталева гофрована стрічка (захист від гризунів та механічних пошкоджень)
Матеріал зовнішньої оболонки	Н – поліетилен, що не поширює горіння, безгалогенний (LSZH)
Діаметр кабелю	12 мм
Мінімальний радіус вигину	Не менше 20 діаметрів кабелю
Діапазон температур експлуатації та монтажу	-40 °С ... +60 °С
Вага кабелю (орієнтовно)	160 кг/км

Аналіз даних таблиці 3.3 показує, що технічні характеристики вибраного оптичного кабелю ОКТБГ-М (2,7)П-12Е1 забезпечують надійну передачу сигналу на відстань до 20 км із мінімальними втратами та відповідають проведеним у 2 розділі роботи розрахункам оптичного бюджету. Оболонка Н (LSZH) дозволяє заводити кабель всередину вузлів зв'язку (до OLT у серверній), оскільки вона не виділяє токсичних газів під час горіння.

3.4.2 Розподільча ділянка

Відповідно до рисунка 2.5 розподільча ділянка мережі – кабелі, що йдуть безпосередньо до базових станцій: від сплітера до оптичного терміналу CBU Huawei T823E-G. Оскільки на території базової станції та всередині шасі кабель може часто вигинатися, використовуємо дроп-кабель з захистом від

ультрафіолету та гризунів з одномодовим волокном зі зменшеним радіусом вигину – згідно рекомендацій ITU-T стандарту G.657.A1.

За [12] вибираємо одномодовий оптичний кабель марки Corning Drop Cable SMF-28 Ultra (рис. 3.7). Це волокно унікальне тим, що воно повністю сумісне зі стандартом G.652.D, але при цьому відповідає вимогам G.657.A1.

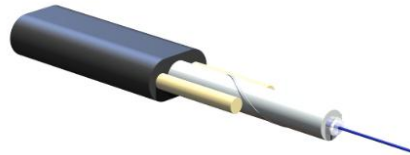


Рисунок 3.7 – Одномодовий оптичний кабель марки Corning Drop Cable SMF-28 Ultra [12]

Вибраний Drop Cable має плоску форму, що робить його зручним для підвісу, оскільки він має низьку парусність і високу стійкість до розтягування. Технічні характеристики кабелю наведені у таблиці 3.7 згідно [12].

Таблиця 3.7 – Технічні характеристики оптичного кабелю Corning Drop Cable SMF-28 Ultra

Параметр	Значення / Розшифрування
Тип оптичного волокна	Одномодове волокно (стандарт G.657.A1)
Загальна кількість волокон	2 або 4
Коефіцієнт згасання (1310 / 1550 нм)	0,34 / 0,20 дБ/км
Тип броні	Технологія FastAccess. Світлостабілізований поліетилен низького тиску (LSPE) – стійкий до УФ
Матеріал зовнішньої оболонки	Два діелектричні стержні (FRP) або арамідні нитки
Мінімальний радіус вигину	10 мм
Діапазон температур експлуатації та монтажу	-40 °C ... +70 °C
Вага кабелю	46 кг/км

«Волокно SMF-28 Ultra дозволяє використовувати кабель як на довгих магістралях, так і на коротких ділянках з великою кількістю вигинів біля терміналу» [11].

3.4.3 Патч-корди (для внутрішніх з'єднань)

Для обладнання Huawei використовуються типи патч-кордів SC / UPC або LC / UPC для SFP-модулів. Патч-корди мають бути стійкими до перепадів температур (LSZH оболонка).

3.5 Синхронізація частоти та часу (PTP IEEE 1588, SyncE) в мережах GPON для коректної роботи софт-хендоверу

Синхронізація є важливою для мобільного бекхолу, оскільки без неї базова станція не зможе коректно передати абонента сусідній станції під час софт-хендоверу, що призведе до розриву з'єднання або втрати пакетів. У мережах 4G усі базові станції повинні працювати узгоджено, єдиною системою, тому необхідно забезпечити як синхронізацію частоти, так і синхронізацію часу та фази. Синхронізація частоти дозволяє уникнути дрейфу сигналу та взаємних перешкод між сотами, тоді як синхронізація часу забезпечує можливість одночасної роботи декількох станцій з одним абонентом і безшовне перемикання між ними.

Одним із механізмів перемикання є технологія SyncE, яка працює на фізичному рівні та передає стабільну тактову частоту через Ethernet-мережу. У GPON-середовищі OLT отримує еталонну частоту з ядра мережі та розповсюджує її через PON-дерево до абонентських терміналів. Це забезпечує високу стабільність частоти, однак SyncE не передає інформацію про точний час, а лише задає ритм роботи мережі.

«Для передачі точного часу використовується протокол IEEE 1588 v2 (PTP), який працює на рівні пакетів і використовує часові мітки. У такій моделі один пристрій виступає джерелом точного часу, а інші підлаштовуються під нього. У GPON-мережі OLT виконує роль проміжного вузла, який компенсує затримки передачі даних. Оскільки GPON має асиметричні затримки між напрямками передачі, сучасне обладнання застосовує спеціальні алгоритми для їх компенсації, що дозволяє досягти високої точності синхронізації. Для мобільного бекхолу використовується комбінований підхід, де SyncE

відповідає за стабільність частоти, а IEEE 1588 v2 забезпечує точну синхронізацію часу та фази. OLT отримує еталонний сигнал через BITS-інтерфейси від зовнішніх джерел, таких як GPS або первинні еталонні генератори. Далі цей сигнал передається через мережу до терміналів, які підтримують функції Boundary Clock і забезпечують точну доставку синхронізації до базових станцій» [5].

Використання сучасного обладнання та поєднання SyncE і PTP дозволяє досягти наносекундної точності синхронізації для стабільної роботи 4G мережі.

3.6 Методи моніторингу та діагностики інтегрованої лінії зв'язку в реальному часі

«Моніторинг та діагностика інтегрованої лінії зв'язку в реальному часі є важливою складовою забезпечення стабільної та надійної роботи сучасних телекомунікаційних мереж. Особливо це актуально для мереж доступу, побудованих на базі обраного обладнання Huawei, яке використано у GPON-мережі для надання широкосмугового доступу та організації мобільного бекхолу. Для ефективного контролю стану такої мережі доцільно застосовувати комплексний підхід, що охоплює фізичний, мережевий та системний рівні» [5].

На фізичному рівні основну увагу приділяють стану оптичної розподільчої мережі ODN, оскільки саме вона є базою для передачі сигналу. Одним із методів діагностики є використання вбудованого оптичного рефлектометра eOTDR, який реалізований в обладнанні Huawei. Його особливістю є можливість проведення вимірювань без відключення абонентів, що дозволяє здійснювати контроль у реальному часі. Принцип його роботи базується на аналізі відбитого оптичного сигналу, завдяки чому система здатна виявляти обриви волокна, мікрОВигини, деградацію сплітерів, а також забруднення чи пошкодження конекторів. Крім того, eOTDR дозволяє з

високою точністю визначати відстань до місця пошкодження, що значно спрощує процес її локалізації та усунення [8].

«Додатково на фізичному рівні використовується технологія цифрового моніторингу параметрів оптичних модулів – DOM. Вона забезпечує безперервне відстеження таких показників, як рівень переданої та прийнятої оптичної потужності, температура модуля та струм зміщення лазера. У разі відхилення цих параметрів від встановлених порогових значень система автоматично формує аварійні повідомлення. Наприклад, при зниженні рівня прийнятого сигналу нижче критичного значення система сигналізує про можливу деградацію лінії. Це дозволяє виявляти потенційні проблеми ще до виникнення повного розриву зв'язку та своєчасно проводити профілактичне обслуговування» [8].

«На мережевому рівні важливим є контроль логічної цілісності з'єднання та перевірка фактичної передачі даних. Для цього використовуються протоколи OAM та BFD. Ethernet OAM (802.3ah та 802.1ag) забезпечує механізми контролю канального рівня, дозволяючи виявляти розриви з'єднання, перевіряти доступність вузлів та виконувати діагностичні операції, такі як петльовий інтерфейс (loopback – це віртуальний (програмний) мережевий інтерфейс, який не прив'язаний до жодного фізичного порту пристрою) і трасування маршруту. Це дає можливість точно визначити ділянку мережі, на якій виникла проблема. У свою чергу, протокол BFD забезпечує надшвидке виявлення відмов у логічному з'єднанні, реагуючи на них протягом мілісекунд. Завдяки цьому він широко використовується у схемах резервування, коли у випадку втрати основного каналу відбувається автоматичне переключення на резервний шлях без помітного впливу на роботу мережі» [4].

Окрім контролю доступності з'єднання, важливим аспектом є аналіз якості переданого трафіку. У цьому контексті застосовуються методи QoS-моніторингу, які дозволяють оцінювати такі параметри, як затримка, варіація затримки (джиттер) та втрати пакетів. Як було відзначено вище, ці показники

важливі для стільникового зв'язку стандарту 4G, де навіть незначні відхилення можуть призвести до зниження якості обслуговування. «Збір даних здійснюється за допомогою потокової телеметрії, а також аналізу мережевих потоків, що дає змогу оперативно реагувати на погіршення параметрів і підтримувати відповідність вимогам SLA» [4].

«На системному рівні всі процеси моніторингу та діагностики інтегруються у централізовані системи управління мережею. Вони забезпечують комплексний контроль за всіма елементами мережі, надаючи оператору зручний інтерфейс для візуалізації топології, відстеження стану обладнання та аналізу подій у реальному часі. Однією з функцій є інтелектуальне управління аваріями, яке передбачає автоматичне групування повідомлень і визначення першопричини несправності. Наприклад, у випадку одночасного відключення декількох абонентів система може встановити, що причиною є пошкодження магістрального кабелю, а не окремі локальні відмови. Крім того, такі системи забезпечують накопичення статистичних даних, аналіз тенденцій та прогнозування можливих відмов, що дозволяє підвищити ефективність експлуатації мережі» [4].

Отже, використання комплексного моніторингу та діагностики в реальному часі забезпечує високу надійність і стабільність мережі. Поєднання контролю фізичних та логічних параметрів мінімізує час простою та гарантує високу якість надання послуг.

3.7 Адаптація розробленої GPON-інфраструктури до вимог стільникового зв'язку п'ятого покоління

Розроблена GPON-мережа на базі обладнання Huawei MA5800 є фундаментом, який дозволяє забезпечити потреби поточного стандарту 4G та має значний потенціал для подальшої адаптації до вимог 5G. Проаналізуємо технічні можливості трансформації створеної архітектури у високоефективне рішення для 5G, що дозволить оператору мінімізувати капітальні витрати при

переході на нові стандарти зв'язку.

1. Використання двох терміналів Huawei MA5800-X2 у поєднанні зі спліттерами 2:4 дозволяє реалізувати архітектуру подвійного резервування, що забезпечує безперебійну роботу базових станцій навіть у разі виходу з ладу одного з контролерів або обриву магістрального волокна.

2. Завдяки вільному порту на сплітері та модульній конструкції OLT, поточну мережу можна швидко масштабувати, підключаючи додаткові базові станції без необхідності перепроєктування всієї оптичної інфраструктури.

3. Обрані термінали CBU серії OptiXstar T823E-G вже підтримують протокол точного часу 1588 v2, що є важливою технічною характеристикою для переходу до стандартів 5G, де необхідна наносекундна точність фазової синхронізації.

4. Платформа MA5800 підтримує конвергенцію різних поколінь PON, що дозволяє у майбутньому перейти на стандарт XG(S)-PON (10 Гбіт/с) шляхом простої заміни лінійних карт та клієнтських CBU, зберігаючи при цьому існуючу кабельну мережу G.652D. Розподілена архітектура обробки даних у вибраному обладнанні мінімізує час проходження пакетів, що повністю відповідає вимогам сервісів 5G щодо мінімальних затримок у транспортному сегменті.

5. Використання волокна G.652D дозволяє використовувати технологію WDM (ущільнення за довжиною хвилі), що дасть змогу в перспективі «запустити» сигнали 4G та 5G по одному і тому самому волокну на різних частотах.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

При побудові сучасних телекомунікаційних мереж необхідно враховувати вплив небезпечних і шкідливих факторів на персонал під час монтажу, налаштування та експлуатації мережі.

Одним із основних небезпечних факторів є вплив лазерного випромінювання, яке використовується для передачі сигналу в оптичному волокні. Хоча рівень випромінювання в GPON-системах зазвичай є безпечним при нормальній експлуатації, існує ризик пошкодження органів зору під час прямого потрапляння випромінювання в око, зокрема під час роботи з відкритими оптичними конекторами або несправними модулями. Небезпека підвищується під час використання сервісних довжин хвиль (1625...1650 нм), які не видимі для людини, що ускладнює виявлення джерела випромінювання.

Не менш важливим фактором є електрична безпека, пов'язана з живленням активного обладнання, зокрема OLT Huawei MA5800-X2. Це обладнання працює від джерел постійного струму та може мати значну споживану потужність. Порушення правил електробезпеки, неправильне заземлення або пошкодження ізоляції можуть призвести до ураження електричним струмом або короткого замикання. Особливу увагу необхідно приділяти роботі в серверних приміщеннях і телекомунікаційних шафах.

Під час монтажу та обслуговування оптичних ліній виникає ризик механічних травм. Оптичне волокно має дуже малий діаметр і може легко ламатися, утворюючи гострі уламки, які здатні проникати під шкіру або в очі. Крім того, роботи з прокладання кабелю можуть виконуватися на висоті або в обмежених просторах, що створює додаткові небезпеки, такі як падіння або травмування інструментами.

До шкідливих факторів також належить вплив мікроклімату приміщень, де розміщується обладнання. Підвищена температура, недостатня вентиляція

або висока вологість можуть негативно впливати як на працездатність персоналу, так і на стабільність роботи обладнання. Для OLT та іншого активного обладнання важливо забезпечити належне охолодження та підтримання оптимальних умов експлуатації.

В процесі роботи електрообладнання виникає електромагнітне випромінювання, яке створюється активним мережевим обладнанням. Хоча його рівень зазвичай не перевищує допустимих норм, тривалий вплив у закритих приміщеннях може розглядатися як потенційно шкідливий фактор, особливо при високій концентрації обладнання.

Окремо слід виділити психофізіологічні фактори, які виникають під час роботи персоналу. До них належать підвищене навантаження на зір при роботі з дрібними елементами (оптичні конектори, зварювання волокон), тривала робота за комп'ютером при налаштуванні систем управління, а також стресові ситуації під час аварійних робіт, коли необхідно швидко відновити зв'язок.

Таким чином, при впровадженні та експлуатації GPON-мереж у стільниковій інфраструктурі необхідно комплексно враховувати вплив лазерного випромінювання, електричних, механічних, кліматичних, електромагнітних та психофізіологічних факторів. Їх своєчасна ідентифікація та аналіз є основою для розробки ефективних заходів з охорони праці та забезпечення безпечних умов роботи персоналу.

4.2 Зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів

Для забезпечення безпечних умов праці при інтеграції фіксованого зв'язку за технологією GPON у стільникові мережі необхідно впроваджувати комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на зменшення впливу небезпечних і шкідливих факторів на обслуговуючий персонал відповідно до чинних нормативних документів України.

Одним із заходів є захист від впливу лазерного випромінювання. Під час роботи з оптичними лініями категорично забороняється дивитися в торець

оптичного волокна або конектора без використання спеціальних вимірювальних приладів. Необхідно застосовувати захисні ковпачки для конекторів та використовувати індикатори наявності сигналу. Роботи слід виконувати з урахуванням вимог стандарту ДСТУ EN 60825-1, який регламентує безпеку лазерних виробів. Персонал повинен бути проінструктований щодо небезпеки інфрачервоного випромінювання та забезпечений засобами індивідуального захисту [12].

З метою запобігання механічним травмам під час роботи з оптичним волокном необхідно дотримуватися вимог ДСТУ EN 50174 щодо монтажу кабельних систем. Усі відходи волокна повинні утилізуватися у спеціальні контейнери, а робочі місця – бути організовані відповідно до правил безпечного виконання монтажних робіт. При виконанні робіт на висоті слід керуватися вимогами НПАОП 0.00-1.15-07 (Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті).

Для зниження ризику ураження електричним струмом необхідно дотримуватися вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98). Усе обладнання повинно бути надійно заземлене, а роботи з електроживленням мають виконуватися лише персоналом з відповідною групою допуску. При технічному обслуговуванні необхідно застосовувати діелектричні засоби захисту та інструменти з ізольованими ручками [13, 14].

Зниження впливу електромагнітного випромінювання забезпечується відповідністю обладнання вимогам ДСТУ EN 55032 та ДСТУ EN 61000, які регламентують електромагнітну сумісність технічних засобів. Розміщення обладнання має здійснюватися з урахуванням допустимих рівнів електромагнітних полів.

Для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов необхідно дотримуватися норм ДСН, які регламентують параметри температури, вологості та швидкості руху повітря у виробничих приміщеннях. Приміщення

з телекомунікаційним обладнанням повинні бути оснащені системами вентиляції та кондиціонування, що забезпечують стабільну роботу технічних засобів та комфортні умови праці.

Для зменшення психофізіологічного навантаження необхідно дотримуватися вимог ДСН, що встановлюють правила роботи з терміналами. Це включає організацію режиму праці та відпочинку, ергономічне облаштування робочого місця та забезпечення належного освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018.

Впровадження заходів із урахуванням вимог державних стандартів, санітарних норм і правил охорони праці дозволить значно зменшити вплив небезпечних і шкідливих факторів, забезпечити безпечні умови праці персоналу та підвищити надійність функціонування телекомунікаційної мережі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження та розробка інтегрованої транспортної мережі для стільникового зв'язку на базі технології GPON. На основі отриманих результатів зроблено такі висновки:

1. Визначено, що сучасні стільникові мережі потребують високої пропускної здатності (до 1 Гбіт/с на соту в 4G) та надточної синхронізації. Порівняльний аналіз сучасних технологій транспортної інфраструктури показав, що GPON є економічно вигідною та технічно адаптованою альтернативою традиційним радіорелейним лініям у міських та приміських районах.

2. Обґрунтовано архітектуру транспортного рівня стільникової мережі GPON, де оптичний лінійний термінал OLT виступає вузлом агрегації трафіку. Використання такої конвергентної платформи дозволяє оператору одночасно обслуговувати сегмент фіксованого доступу та базові станції, оптимізуючи використання волоконно-оптичної інфраструктури.

3. Розроблено топологію мережі з підтримкою механізму Dual-Parenting (використання двох OLT Huawei MA5800-X2 та спліттерів PLC 2×4). Це забезпечує рівень доступності мережі 99,999 %. Цей показник є важливим для безперервної роботи стільникового зв'язку стандарту 4G.

4. Розраховано параметри QoS, де пріоритет було надано голосовому (VoLTE), відео (ViLTE) та сигнальному трафіку базових станцій над абонентським трафіком «best-effort». Використання контейнерів T-CONT дозволило мінімізувати джиттер та затримки пакетів. Проведений розрахунок оптичного бюджету для траси довжиною ~20 км підтвердив працездатність для визначеної схеми передачі даних. Вибране волокно стандарту G.652D забезпечує низьке загасання сигналу, залишаючи достатній запас потужності для стабільної передачі даних через пасивні компоненти на рівні 7,6 дБ.

5. На основі прийнятих рішень та проведених обчислень розроблено функціональну схему транспортної стільникової мережі за технологією

GPON.

6. Обґрунтовано використання професійних оптичних терміналів OLT Huawei MA5800-X2 та CBU серії Huawei OptiXstar T823E-G, які підтримують протокол точного часу IEEE 1588 v2 та мають два оптичні входи для резервування каналів, що повністю відповідає специфікаціям стандарту 4G.

7. Оцінка потенціалу мережі засвідчила її готовність до впровадження 5G. Платформа MA5800 дозволяє здійснити перехід на 10 Гбіт/с XGS-PON шляхом заміни лінійних карт без модернізації існуючої кабельної мережі, що захищає довгострокові інвестиції оператора зв'язку.

Таким чином, у роботі було досягнуто мету: опрацьовано технічні рішення щодо інтеграції технології GPON у транспортну інфраструктуру сучасних стільникових мереж для забезпечення ефективної передачі трафіку від базових станцій до ядра мережі стандарту 4G з можливістю подальшого її масштабування до стандарту 5G.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шуста В. С., Сусла А. І., Біганич В. Ю. Трансформація мережевих технологій: від 4G до 5G. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 35 (74) № 3. Київ, 2024. С. 94–99. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/3_2024/part_2/15.pdf (дата звернення 04.04.2026 р.)
2. Рекомендації Міжнародного союзу електрозв'язку ITU-T серії G.984. URL: <https://www.itu.int/epublications/publication/itu-t-g-984-5-2022-02-gigabit-capable-passive-optical-networks-g-pon-enhancement-band> (дата звернення 08.04.2026 р.)
3. Волоконно-оптичні лінії зв'язку. URL: <https://eir.zp.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ce3256ca-a524-4708-ada0-9bde2c3a37c2/content> (дата звернення 11.04.2026 р.)
4. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Telecommunication: problems and innovation». Збірник тез. К.: ДУТ, 2022. 128 с. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2121_16069800.pdf?file=p_2121_16069800.pdf (дата звернення 11.04.2026 р.)
5. Рішення для мобільного транспортного зв'язку GPON URL: https://www.zte.com.cn/global/about/magazine/zte-technologies/2010/11/en_512/194552.html (дата звернення 18.04.2026 р.)
6. Основи VoLTE URL: <https://ourtechplanet.com/volte-basics-planning-dimensioning/> (дата звернення 18.04.2026 р.)
7. Технологія GPON: принцип розрахунку. URL: <https://homenet.online/tehnologiya-gpon-shcho-tse-pidklyuchennya-internetu-za-tehnologiyeyu-gpon/> (дата звернення 25.04.2026 р.)
8. GPON термінал Huawei MA5800-X2 URL: <https://deps.ua/ua/katalog/concentrators-olt/48158.html> (дата звернення 08.05.2026 р.)
9. Оптичний мережевий термінал Huawei OptiXstar T823E-G URL:

<https://e.huawei.com/en/products/optical-terminal/optixstar-t823eg> (дата звернення 08.05.2026 р.)

10. SFP-модулі HUAWEI URL: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100069149/6fad2163/optical-electrical-modules> (дата звернення 08.05.2026 р.)

11. Характеристика оптичного кабелю. URL: <https://odeskabel.com/ua/products/katalog-vok.html> (дата звернення 12.05.2026 р.)

12. Оптичний кабель марки Corning Drop Cable SMF-28 Ultra. URL: <https://ecatalog.corning.com/optical-communications/US/en/Fiber-Optic-Cables/Outdoor/Outdoor-Duct-Cables/SST-Drop%E2%84%A2-Single-Tube%2C-Gel-Filled-Cable/p/001ZB4-14120A20> (дата звернення 12.05.2026 р.)

13. ДСТУ EN 60825-1:2019. Безпечність лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/tekst_dstu_en_60825-1_2019_bezpeka_lazernikh_virobiv._chastin.pdf (дата звернення 22.05.2026 р.)

14. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758 (дата звернення 22.05.2026 р.)

15. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644 (дата звернення 22.05.2026 р.)

16. ГБН В.2.2-34620942-002:2015. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=61666 (дата звернення 23.05.2026 р.)