

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

(повна назва)

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Удосконалення методів проектування PON

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІМІм-24-1

Хан Микита Олександрович

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації

та радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____

Інформаційно-мережна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Костромицький А. І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____

(підпис)

Микола МОСКАЛЕЦЬ

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент / Хан М. О. /

Керівник /доц. Костромицький А. І./

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
Кафедра Інформаційно-мережної інженерії
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Хану Микиті Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення методів проектування PON
затверджена наказом університету від 24 жовтня 2025 р. № 959 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 26 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз мереж PON, методів їх проектування та шляхи вдосконалення цих методів. Розглянути один з вдосконалених методів, навести його переваги, проаналізувати можливість поєднання цього методу з іншими.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
Вступ
1. Технологія пасивних оптичних мереж PON.
2. Методи проектування мережі PON
3. Енергетична ефективність у PON
4. Огляд практичного використання методів вдосконалення мереж PON
Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи; технологія пасивних оптичних мереж PON; принцип дії PON; стандарти PON; методи проектування мереж; удосконалення методів проектування; енергетична ефективність; огляд практичного використання удосконалених методів проектування; гіпотеза QGIS; поєднання QGIS та PyQGIS; висновки

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Ознайомлення із завданням. Уточнення</i>	<i>24.10.25</i>	
2	<i>Підбір літератури за темою роботи.</i>	<i>25.10-01.11.25</i>	
3	<i>Аналіз принципу дії технології PON</i>	<i>01.11-7.11.25</i>	
4	<i>Аналіз методів проектування PON</i>	<i>08.11-12.11.25</i>	
5	<i>Аналіз шляхів вдосконалення методів проектування</i>	<i>13.11-18.11.25</i>	
6	<i>Огляд QGIS, його поєднання з іншими методами та PyQGIS</i>	<i>19.11-25.11.25</i>	
7	<i>Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту в ЕК</i>	<i>26.11-10.12.25</i>	

Дата видачі завдання 24 жовтня 2025 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Костромицький А.І.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 52 с., 4 рис., 2 табл., 14 джерел, 1 додаток.

Об'єкт дослідження – удосконалення методів проектування мереж PON.

Мета роботи – проаналізувати удосконалені методи проектування мереж PON.

PON є передовою технологією, яка надає високу пропускну здатність, низькі витрати на експлуатацію, а також високу надійність, шляхом використання оптичного волокна і пасивних компонентів. За допомогою пасивних оптичних мереж, можна передавати дані на велику відстань і при цьому мати мінімальні втрати. Таким чином PON добре підходить для сучасних вимог широкопasmового доступу.

У цій роботі було проаналізовано принцип дії технології PON, методи проектування мережі, стандарти технології. Проаналізовано як можна вдосконалити ці методи проектування. Розглянуто як на практиці можна використати один з вдосконалених методів та поєднувати його з іншими варіантами вдосконалення мереж.

ОПТИЧНА ПАСИВНА МЕРЕЖА, PON, GPON, ONT, OLT, ONU, QoS, QGIS, PyQGIS.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 52 p., 4 fig., 2 tab., 14 sources, 1 appendix.

The object of the study – improvement of PON network design methods.

The purpose of the work – analyze improved PON network design methods.

PON is an advanced technology that provides high throughput, low operating costs, and high reliability through the use of optical fiber and passive components. With the help of passive optical networks, data can be transmitted over long distances and at the same time have minimal losses. Thus, PON is well suited to modern broadband access requirements.

This work analyzed the principle of operation of PON technology, network design methods, technology standards. It analyzed how these design methods can be improved. It considered how one of the improved methods can be used in practice and combined with other options for improving networks.

OPTICAL PASSIVE NETWORK, PON, GPON, ONT, OLT, ONU, QoS, QGIS, PyQGIS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	11
1 ТЕХНОЛОГІЯ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ PON.....	12
1.1 Принцип роботи PON	12
1.2 Переваги системи PON	14
1.3 Еволюція та стандарти PON.....	15
1.4 Якість обслуговування в PON (QoS).....	17
2 МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖІ PON.....	20
2.1 Удосконалення методів проектування мережі PON.....	22
2.2 GIS-орієнтовані методи проектування. QGIS та його використання в проектуванні	22
2.3 Імітаційні методи	26
2.4 Економічні методи	28
2.5 Методи забезпечення надійності.....	30
3 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ У PON	33
3.1 Джерела енергоспоживання в PON	33
3.2 Методи підвищення енергоефективності	33
4 ОГЛЯД ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕРЕЖ PON.....	35
4.1 Гіпотеза про QGIS	35
4.2 Комбінація QGIS та PyQGIS	37
4.3 Комбінація QGIS з іншими вдосконаленими методами проектування. 38	
ВИСНОВОК.....	41
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	42

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- PON – Passive Optical Network (пасивна оптична мережа)
- GPON – Gigabit Passive Optical Network (гігабітна пасивна оптична мережа)
- XG-PON – 10-Gigabit Passive Optical Network (десятигігабітна PON)
- XGS-PON – 10-Gigabit Symmetric Passive Optical Network (симетрична десятигігабітна PON)
- NG-PON2 – Next Generation Passive Optical Network 2 (мережа наступного покоління)
- OLT – Optical Line Terminal (оптичний лінійний термінал)
- ONU/ONT – Optical Network Unit / Terminal (оптичний мережевий блок / термінал)
- ODN – Optical Distribution Network (оптична розподільча мережа)
- WDM – Wavelength Division Multiplexing (мультиплексування з поділом довжини хвилі)
- QoS – Quality of Service (якість обслуговування)
- TDMA – Time Division Multiple Access (множинний доступ із часовим поділом)
- DBA – Dynamic Bandwidth Allocation (динамічний розподіл смуги пропускання)
- CAPEX – Capital Expenditure (капітальні витрати)
- OPEX – Operational Expenditure (операційні витрати)
- SLA – Service Level Agreement (угода про рівень послуг)
- GIS – Geographic Information System (геоінформаційна система)
- BIM – Building Information Modeling (інформаційне моделювання будівель)
- AI/ML – Artificial Intelligence / Machine Learning (штучний інтелект / машинне навчання)
- APON – Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network (асинхронна PON на базі ATM)
- BPON – Broadband Passive Optical Network (широкосмугова PON)

ВСТУП

Сучасні телекомунікаційні системи зазнають постійного розвитку у зв'язку з динамічним зростанням обсягів переданої інформації та підвищенням вимог до якості обслуговування користувачів. Одним із ключових напрямів розвитку є впровадження пасивних оптичних мереж (PON), які забезпечують високошвидкісну, надійну та енергоефективну передачу даних. PON широко застосовуються в архітектурах доступу нового покоління (Next Generation Access, NGA), що робить їх стратегічно важливими для побудови сучасних інформаційно-комунікаційних інфраструктур.

Разом із тим, зростання кількості абонентів, розширення спектра послуг та необхідність оптимального використання ресурсів мережі висувають нові вимоги до методів проектування PON. Традиційні підходи не завжди враховують складність мережевих топологій, економічні аспекти та перспективи масштабування. Тому актуальним завданням є удосконалення методів проектування, що передбачає комплексний підхід до вибору топології, розрахунку параметрів та оптимізації витрат.

Мета даної роботи полягає у дослідженні сучасних принципів побудови пасивних оптичних мереж, виявленні їх недоліків та розробці шляхів удосконалення методів проектування з урахуванням технічних, економічних і експлуатаційних факторів.

1 ТЕХНОЛОГІЯ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ PON

PON (Passive optical network) – технологія пасивних оптичних мереж, заснована на деревоподібній волоконно-кабельній архітектурі з пасивними оптичними розгалужувачами на вузлах. [1] Зазвичай є досить економічним способом забезпечення широкосмугової передачі інформації. [1] При цьому архітектура PON володіє необхідною ефективністю нарощування як вузлів мережі, так і пропускної здатності, залежно від поточних та майбутніх потреб абонентів. [1] Перші кроки в технології PON були зроблені в 1995 році, коли впливова група з семи компаній (British Telecom, France Telecom, Deutsche Telecom, NTT, KPN, Telefonica і Telecom Italia) створила консорціум для того, щоб втілити в життя ідеї множинного доступу по одному волокну. [1] Ця організація отримала назву FSAN (full service access network). Багато нових членів, як операторів, так і виробників обладнання увійшло до неї наприкінці 90-х років [2]. Метою FSAN була розробка загальних рекомендацій та вимог до обладнання PON для того, щоб виробники устаткування та оператори могли співіснувати разом на конкурентному ринку систем доступу PON [2].

1.1 Принцип роботи PON

PON - це аббревіатура пасивної оптичної мережі, що означає, що оптична розподільча мережа не містить жодних електронних пристроїв та електронного джерела живлення. [3] Оптична розподільча мережа (Optical Distribution Network, ODN) складається з пасивних компонентів, таких як спліттер, і не потребує дорогого активного електронного обладнання. [3] Пасивна оптична мережа складається з оптичного лінійного терміналу (Optical Line Terminal, OLT), встановленого на центральній станції управління, та партії підтримуючих блоків оптичної мережі, встановлених на сайті користувача. [3]

ODN між OLT та абонентським терміналом (Optical Network Unit, ONU) містить оптичне волокно та пасивний розгалужувач або розгалужувач. [3] Технологія GPON (PON, що підтримує гігабіт) - це широкосмуговий пасивний оптичний інтегрований стандарт доступу останнього покоління, заснований на ІТУ-TG. 984. X стандарт. [3] Він має безліч переваг, таких як висока пропускна

здатність, висока ефективність, велике покриття, багатий користувацький інтерфейс тощо. [3] Це розглядається як ідеальна технологія для широкопугового доступу та всебічної трансформації послуг мережі доступу більшістю операторів. [3]

Структура системи PON складається в основному з OLT в центральному офісі, ODN, що містить пасивні оптичні пристрої, та модуля ONU на кінці користувача. [4] Різниця полягає в тому, що ONT знаходиться безпосередньо на кінці користувача, тоді як між ONU та користувачами існують інші мережі (наприклад, Ethernet) та система управління мережевими елементами. [4] Зазвичай приймається структура топології дерева від точки до багатоточок (рис. 1.1, 1.2).

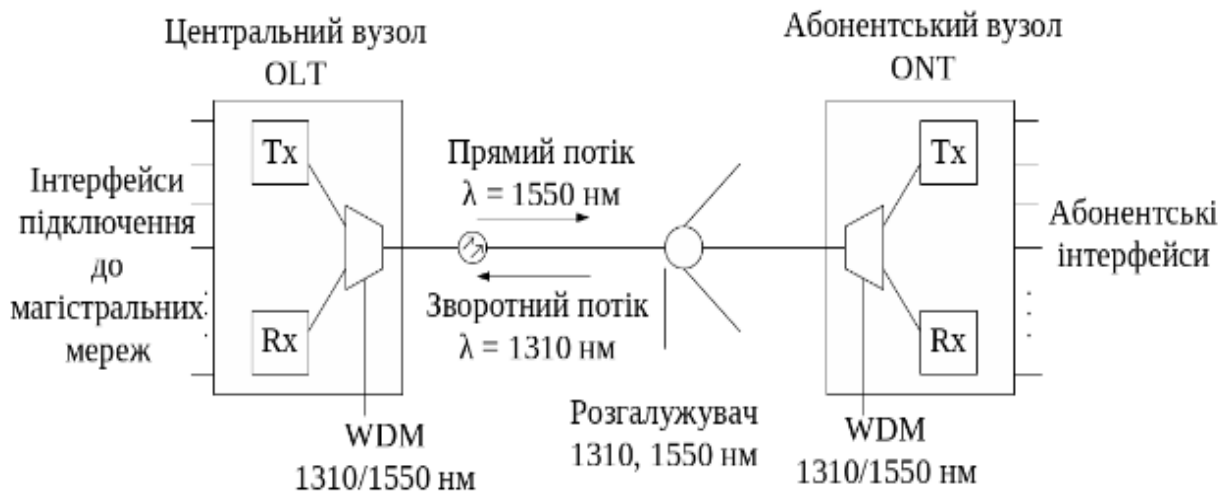


Рисунок 1.1 – Структура мережі PON

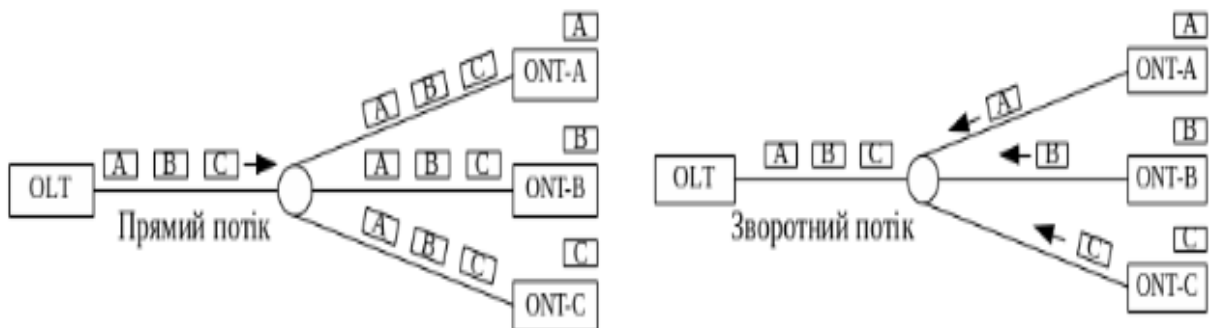


Рисунок 1.2 – Передача трафіку у PON

У напрямі низхідної лінії зв'язку дані IP, голосові, відео та інші послуги розподіляються між усіма блоками ONU на PON через пасивний оптичний розподільник 1: n в ODN OLT в центральному офісі. [4] У висхідному напрямку множинна службова інформація від кожного ONU з'єднується з одним оптичним волокном через пасивний оптичний комбінат 1: n в ODN і, нарешті, надсилається до приймача OLT в офісі, що є подібним до точки -структура точки. [4]

1.2 Переваги системи PON

1. Відносно невисока вартість, просте обслуговування, легке розширення, легке оновлення. [5] Структура PON не потребує джерела живлення та електронних компонентів в передачі, тому її легко укласти, в основному не потрібно технічне обслуговування та економить багато довготривалих експлуатаційних та управлінських витрат [5]

2. Пасивна оптична мережа (PON) - це чисто середня мережа, яка може повністю уникнути електромагнітних перешкод та удару блискавки, і дуже підходить для використання в районах із поганими природними умовами. [5]

3. Система PON займає мало ресурсів місцевого офісу, має низькі початкові інвестиції, легке розширення та високу рентабельність інвестицій. [5]

4. Забезпечує дуже високу пропускну здатність. EPON може забезпечити пропускну здатність 1,25 Гбіт / с, симетричну вгору і вниз, і може бути модернізований до 10 Гбіт / с за допомогою розвитку технології Ethernet. GPON має пропускну здатність до 2,5 Гбіт / с.. [6]

5. Спектр послуг великий. Як точка до багатоточкової мережі, PON використовує віялоподібну структуру для економії спільних ресурсів та обслуговування великої кількості користувачів. Спосіб спільного користування офісним обладнанням та оптичним волокном може заощадити інвестиції користувачів. [6]

6. Розподіл смуги пропускання є гнучким, а якість обслуговування (QoS) гарантована. Система G / EPON має повну систему розподілу смуги пропускання та гарантування. Може досягти рівня SLA на рівні користувача. [6]

Система PON використовує технологію WDM (щільне мультиплексування з поділом довжини хвилі) для реалізації однонаправленої двонаправленої передачі (рис. 1.2)

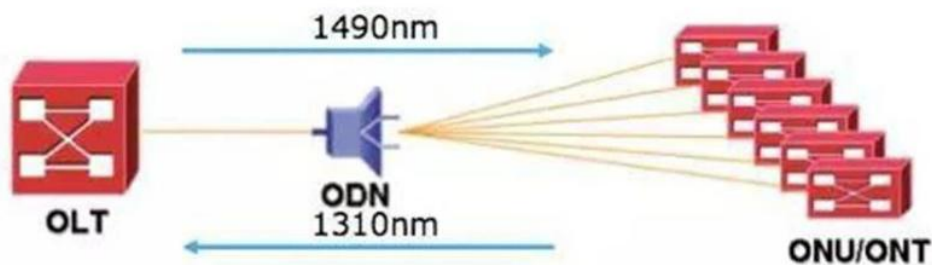


Рисунок 1.3 – Принцип роботи PON

1.3 Еволюція та стандарти PON

Розвиток PON відбувався поступово у відповідь на зростання потреб користувачів у швидкості доступу, кількості сервісів та якості обслуговування. Еволюція стандартів визначається як удосконаленням фізичних характеристик оптичних ліній, так і впровадженням нових протоколів доступу та механізмів керування трафіком (табл. 1.1) [7]

APON та BPON

Першим кроком стали стандарти APON (Asynchronous Transfer Mode PON) та BPON (Broadband PON), які базувалися на технології АТМ і забезпечували швидкість до 622 Мбіт/с. [7] Вони дозволили передавати голос, відео й дані по одному волокну, проте мали обмеження у масштабованості та ефективності використання пропускнуої здатності. [7]

GPON

Наступним етапом став стандарт GPON (Gigabit PON), розроблений ITU-T у серії рекомендацій G.984. [7] Він забезпечує:

- швидкість 2,5 Гбіт/с downstream та 1,25 Гбіт/с upstream;
- коефіцієнт розгалуження до 1:64, у деяких випадках — до 1:128;
- підтримку різних протоколів (Ethernet, IP, TDM).

GPON став наймасовішим стандартом у світі завдяки поєднанню високої швидкості та універсальності. [7]

XG-PON та XGS-PON

Зі зростанням потреб у пропускній здатності було розроблено стандарти XG-PON (10-Gigabit PON) та XGS-PON (симетрична версія). [7] Відповідно до рекомендацій ITU-T G.987 і G.9807.1, вони забезпечують:

- XG-PON: 10 Гбіт/с downstream, 2,5 Гбіт/с upstream;
- XGS-PON: 10 Гбіт/с у обох напрямках.

XGS-PON набув популярності через симетричність, яка є критично важливою для хмарних сервісів, онлайн-ігор та корпоративних клієнтів.

NG-PON2

Подальший розвиток привів до стандарту NG-PON2 (Next-Generation PON 2), що використовує технологію WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing).

[7] Основні характеристики:

- до 40 Гбіт/с downstream і upstream;
- використання кількох довжин хвиль (по 10 Гбіт/с на кожну);
- динамічний розподіл ресурсів між абонентами.

Цей стандарт орієнтований на високонавантажені мережі та інтеграцію з мобільними системами 5G.

25G та 50G PON

Найновішим етапом розвитку стали 25G-PON та 50G-PON, що стандартизуються в рамках ITU-T серії G.9804. [7] Їхні особливості:

- 25G-PON: швидкість до 25 Гбіт/с у прямому напрямку;

- 50G-PON: швидкість до 50 Гбіт/с, підтримка симетричного режиму;
- орієнтація на масовий розвиток IoT, Smart City та мобільні мережі 5G/6G.

Таблиця 1.1 – Порівняння основних стандартів PON

Стандарт	Downstream	Upstream	Коеф. розгалуження	Особливості
APON/BPON	622 Мбіт/с	155 Мбіт/с	1:16–1:32	Використання АТМ
GPON	2,5 Гбіт/с	1,25 Гбіт/с	1:64 (до 1:128)	Масове впровадження
XG-PON	10 Гбіт/с	2,5 Гбіт/с	1:128	Асиметричний
XGS-PON	10 Гбіт/с	10 Гбіт/с	1:128	Симетричний
NG-PON2	40 Гбіт/с+	40 Гбіт/с+	1:128	Використання WDM
25/50G PON	25–50 Гбіт/с	25–50 Гбіт/с	1:128+	Орієнтація на 5G/6G та IoT

1.4 Якість обслуговування в PON (QoS)

Одним із ключових факторів ефективності пасивних оптичних мереж є здатність забезпечувати якість обслуговувати QoS для різних категорій трафіку. [7] Оскільки PON обслуговує велику кількість користувачів через спільний канал доступу, виникає потреба у механізмах справедливого розподілу пропускної здатності, мінімізації затримок та гарантуванні стабільності параметрів передачі даних. [7]

Якість обслуговування у PON визначається кількома показниками:

- пропускна здатність (Bandwidth) – гарантований обсяг даних, який може бути переданий за одиницю часу;
- затримка (Delay) – час, необхідний для доставки пакету від джерела до приймача. Для голосових та відеосервісів критично важливо забезпечити мінімальні затримки;
- джиттер (Jitter) – варіація затримок між пакетами, яка негативно впливає на потокові сервіси (VoIP, IPTV);

– втрати пакетів (Packet Loss) – відсоток даних, які не доходять до отримувача; у мультимедійних додатках навіть незначні втрати можуть суттєво знизити якість. [7]

У пасивних оптичних мережах downstream-трафік передається ширококомовно всім абонентам, тоді як upstream-канал є спільним і вимагає спеціальної організації. [7] Для цього використовується механізм TDMA (Time Division Multiple Access), де кожному ONU виділяються часові слоти для передачі даних. [7]

Основні принципи:

1. Динамічний розподіл смуги пропускання (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA). [7] OLT аналізує потреби абонентів і динамічно розподіляє часові слоти. Це дозволяє враховувати пріоритети трафіку (наприклад, голос вище за P2P-завантаження). [7]

2. Класифікація трафіку.

Трафік ділиться на класи за критеріями важливості:

- T-CONT 1 – для постійного бітрейту (голос, відео в реальному часі);
- T-CONT 2 – для гарантованого бітрейту (бізнес-сервіси);
- T-CONT 3 – для змінного бітрейту (інтернет-серфінг);
- T-CONT 4 – для best-effort (фонові дані, завантаження файлів). [7]

3. Пріоритезація та планування.

У GPON і XG-PON застосовуються алгоритми планування (Weighted Round Robin, Strict Priority, Deficit Round Robin), які визначають, у якій черговості пакети різних сервісів отримують доступ до каналу. [7]

4. Забезпечення SLA у PON

Оператори зв'язку укладають з користувачами угоди про рівень сервісу (Service Level Agreement, SLA), які регламентують параметри QoS. [7] У таких угодах зазвичай фіксуються:

- мінімальна гарантована швидкість доступу;
- максимально допустимі затримки та джиттер;
- відсоток доступності послуги (наприклад, 99,9% часу). [7]

5. Виклики та перспективи QoS у PON

- зі збільшенням кількості абонентів забезпечення QoS ускладнюється через конкуренцію за смугу;
- поява нових сервісів (хмарні застосунки, онлайн-ігри, VR/AR) вимагає симетричного розподілу пропускної здатності, що стимулювало розвиток XGS-PON;
- у майбутньому застосування штучного інтелекту в системах DBA дозволить передбачати пікові навантаження та оптимально розподіляти ресурси в реальному часі. [7]

2 МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖІ PON

Методи проектування пасивних оптичних мереж (PON) охоплюють комплекс різних підходів, що дозволяють забезпечити технічну ефективність, економічну доцільність і перспективу розвитку мережі. [8] Найбільш традиційними є аналітичні методи, які ґрунтуються на математичних розрахунках оптичного бюджету. [8] У межах цього підходу проводиться визначення допустимих довжин оптичних ліній, кількості відгалужень, рівня втрат на волокні, з'єднаннях та спліттерах. [8] Аналітичні методи забезпечують базову оцінку технічної здійсненності проекту та визначають, чи можна реалізувати мережу в межах стандартів GPON, XG-PON чи інших. [8]

Важливе місце займають методи оптимізації, які орієнтовані на мінімізацію витрат і раціональне використання ресурсів. [8] Вони застосовують інструменти математичного програмування, зокрема лінійне та цілочисельне програмування для вибору оптимальних місць розташування обладнання та прокладання кабельних трас. [8] Широко використовуються також графові методи, що дозволяють побудувати мінімальні остовні дерева або оптимальні схеми Steiner, завдяки чому зменшуються довжини волокон і загальні витрати. [8] У випадках складних міських топологій, де точні математичні методи стають надмірно ресурсоемними, застосовуються евристичні алгоритми — генетичні, мурашині або рою частинок. [8] Вони дозволяють знаходити практично оптимальні рішення при великих обсягах даних. [8]

Сучасне проектування практично завжди передбачає використання геоінформаційних систем. [8] GIS-орієнтовані методи дають можливість інтегрувати карти місцевості, дані про будівлі, дороги, рельєф та існуючу інфраструктуру. [8] Це дозволяє враховувати технічні та організаційні обмеження, оптимізувати маршрути волоконно-оптичних ліній і автоматично формувати специфікації обладнання та кошториси. [8] GIS-підхід особливо важливий у великих проєктах, де точність планування істотно впливає на вартість будівництва. [9]

Імітаційні методи орієнтовані на моделювання роботи мережі ще до її реалізації. [9] Використання програмного забезпечення для симуляції дозволяє перевірити параметри якості обслуговування — затримки, джиттер, рівень втрат,

а також протестувати алгоритми динамічного розподілу смуги пропускання. [9] Це дає змогу заздалегідь оцінити, як різні архітектурні рішення чи зміна кількості користувачів впливатимуть на стабільність роботи системи. [9]

Окремий напрям становлять економічні методи, що зосереджуються на аналізі витрат і визначенні вартості володіння мережею протягом усього життєвого циклу. [9] Вони враховують як капітальні витрати (придбання обладнання, прокладання волокон, будівельні роботи), так і операційні витрати (обслуговування, ремонт, оренда інфраструктури). [9] Завдяки економічному моделюванню можна порівнювати різні архітектурні варіанти, наприклад централізоване чи каскадне розщеплення, а також обґрунтовувати вибір коефіцієнтів розгалуження чи рівня резервування. [9]

Надзвичайно важливими є методи проектування, орієнтовані на забезпечення надійності. [9] Вони враховують можливі сценарії відмов і дозволяють підібрати рівень захисту відповідно до вимог користувачів та угод про рівень послуг. [9] Використання схем резервування типу В або С забезпечує безперервність надання послуг навіть у випадку пошкодження волокна чи відмови обладнання, хоча і підвищує вартість мережі. [9] Тому ці методи поєднують як технічні, так і економічні аспекти. [9]

Таким чином, проектування мережі PON здійснюється на основі поєднання кількох методичних підходів. [9] Аналітичні розрахунки формують основу, оптимізаційні алгоритми забезпечують ефективність, GIS-інструменти дозволяють врахувати просторові фактори, імітаційне моделювання гарантує перевірку працездатності, економічні методи визначають доцільність, а методи забезпечення надійності формують умови безперебійної роботи. [9] Лише інтеграція цих підходів дає змогу створити збалансований проєкт PON, який відповідає технічним стандартам, вимогам користувачів і економічним реаліям. [9]

2.1 Удосконалення методів проектування мережі PON

Удосконалення методів проектування пасивних оптичних мереж (PON) є актуальним завданням, оскільки класичні підходи, що базуються на розрахунках оптичного бюджету та простих оптимізаційних моделях, не завжди враховують реальні умови експлуатації, швидкі зміни попиту й тенденції розвитку технологій. [10] Один із напрямів удосконалення стосується аналітичних методів. [10] Сучасні мережі вимагають більш точних моделей розрахунку загасання та шумів, які враховують не лише втрати у волокні та з'єднаннях, але й вплив старіння кабелю, температурних коливань та деградації обладнання. [10] Запровадження адаптивних методик із використанням статистичних даних з реальних мереж дозволяє точніше прогнозувати довговічність і надійність системи. [10]

Методи оптимізації також потребують розвитку. Традиційні математичні моделі мають високу точність, але складні у розв'язанні для великих міських топологій. [10] Перспективним напрямом є використання гібридних алгоритмів, що поєднують точні методи (лінійне та цілочисельне програмування) з евристичними та метаевристичними підходами (генетичні алгоритми, мурашині алгоритми, алгоритми рою частинок). [10] Така інтеграція дозволяє отримати рішення прийнятної якості з меншою обчислювальною складністю. [10] Додатковим напрямом удосконалення є багатокритеріальна оптимізація, що одночасно враховує технічні (довжина ліній, рівень втрат), економічні (CAPEX та OPEX), а також експлуатаційні показники (рівень доступності, SLA). [10]

2.2 GIS-орієнтовані методи проектування. QGIS та його використання в проектуванні

GIS-орієнтовані методи проектування — це підхід, який базується на використанні геоінформаційних систем для збору, аналізу та візуалізації просторових даних під час планування і розбудови мереж, у тому числі PON (рис. 2.1). [10] Вони дозволяють враховувати просторові характеристики території, щільність забудови, розташування користувачів, наявну інфраструктуру та

природні обмеження. [10] Завдяки цьому проектування стає більш точним, оптимізованим і економічно обґрунтованим. [10]



Рисунок 2.1 – Принцип роботи GIS-орієнтованих методів проектування

Вони можуть бути вдосконалені шляхом інтеграції з інтелектуальними системами аналізу даних. [10] Використання супутникових карт високої точності, даних про забудову та транспортні потоки дає змогу ще на етапі проектування враховувати реальні бар'єри та оптимізувати прокладання кабельних трас. [10] Подальший розвиток може бути пов'язаний із впровадженням технологій штучного інтелекту та машинного навчання, які здатні автоматично визначати оптимальні маршрути з урахуванням досвіду попередніх проєктів і прогнозувати майбутні потреби у розширенні мережі. [10]

Наприклад:

При проектуванні мережі GPON у місті середнього розміру з населенням близько 150 тисяч осіб традиційно використовують CAD-середовище та топографічні карти. [10] Такий підхід дає базове уявлення про трасування, але має суттєві обмеження, оскільки не враховує щільність абонентів, реальні умови забудови та не дозволяє оперативно перевіряти оптимальність розташування

вузлів мережі. [10] Для вдосконалення процесу починають застосовувати GIS-платформу, наприклад ArcGIS або QGIS, до якої підключають шари містобудівних даних. [10] У систему інтегрують інформацію про дорожньо-вуличну мережу, кадастрові дані про житлові будинки, щільність населення, наявну інженерну інфраструктуру, каналізаційні колектори та опори, а також вже існуючі точки доступу провайдера. [10]

Завдяки такій інтеграції GIS дозволяє виконати глибший аналіз попиту на послуги зв'язку, виділити райони з найбільшою концентрацією потенційних абонентів та спрогнозувати навантаження. [10] Система автоматично пропонує оптимальні місця розташування головних вузлів та спліттерів, враховуючи допустимі довжини волокон і втрати сигналу. GIS також моделює маршрути прокладання кабельних ліній з урахуванням реальних обмежень, таких як рельєф місцевості, щільність забудови та зони, де роботи проводити заборонено. [10] Крім цього, одразу можна оцінити енергетичну ефективність запропонованої схеми, адже скорочення магістральних відрізків призводить до зменшення кількості активного обладнання і втрат у волокні. [10]

Удосконалений GIS-підхід забезпечує також інтеграцію з BIM-системами, що дозволяє враховувати житлові комплекси, які ще перебувають на стадії будівництва. [10] Завдяки цьому мережа проектується з випередженням майбутніх потреб. [10] У результаті проєктанти і керівництво отримують інтерактивну карту з усіма шарами мережі, яка є зрозумілою і зручною для аналізу та управління. [10] Практичні результати показують скорочення довжини оптичних трас у середньому на 12–18 відсотків, зменшення витрат на будівельно-монтажні роботи приблизно на 10–15 відсотків, точніше балансування абонентського навантаження та швидке оновлення проєктів у разі змін містобудівних умов. [10] У перспективі на основі GIS створюється цифровий двійник мережі PON, який використовується не лише на етапі проєктування, а й під час експлуатації та модернізації інфраструктури. [10]

QGIS — це вільна, кросплатформна ГІС-система, що підтримує роботу з векторними та растровими даними, мережевим аналізом, 3D-візуалізацією та численними плагінами. [10] У контексті проєктування PON- та FTTx-мереж вона дозволяє:

- створювати окремі шари для вузлів, кабельних ліній, спліттерів, абонентів;
- працювати з атрибутивними таблицями для зберігання характеристик мережі;
- аналізувати маршрути ліній, розраховувати їхню довжину та пропускну здатність;
- виконувати топологічні перевірки;
- створювати картографічні макети для документації проекту. [10]

Важливо, що QGIS підтримує відкриті формати даних (GeoPackage, GeoJSON, CSV, SHP), що значно спрощує інтеграцію з іншими інженерними системами. [10]

У практичному проектуванні QGIS використовується для побудови цілісної структури моделі мережі, яка включає шари з обладнанням OLT, місцями розташування спліттерів першого та другого рівнів, магістральними, розподільчими та абонентськими лініями, а також точками потенційних абонентів. [10] Робота з шарами дозволяє інженеру структурувати свою модель так, щоб вона не лише відображала реальний стан місцевості, але й була придатною для подальших розрахунків, аналізу та перевірки правильності проектування. [10]

Однією з найбільших переваг QGIS є наявність потужних інструментів просторового аналізу. [10] Інженер може виконувати пошук найкоротших шляхів, проводити топологічний контроль для уникнення розривів у мережі або неправильно з'єднаних сегментів, будувати буферні зони задля оцінки покриття, аналізувати профіль місцевості та виконувати точні розрахунки довжин кабелів за допомогою вбудованого калькулятора геометрії. [10] Саме ці інструменти дають можливість підвищити якість проекту та зменшити кількість помилок, які виникають при ручному трасуванні ліній. [10]

Крім аналітичних можливостей, QGIS пропонує широкий спектр функцій візуалізації, що є надзвичайно корисним при підготовці дипломних робіт або технічних документів. [10] Інженер може розробити власні схеми стилізації: виділити магістральні лінії окремими кольорами, оформити іконки для обладнання, створити зонування навантаження або радіус покриття мережі. [10]

Вбудований модуль створення макетів дозволяє формувати високоякісні картографічні схеми з легендами, масштабними лінійками, назвами вулиць та підписами мережевих елементів. [10] Це спрощує процес документування та робить проєкт придатним для презентації. [10]

Ще однією важливою перевагою QGIS є підтримка численних сторонніх інструментів та модулів, які дозволяють розширити функціонал програми. [10] Це можуть бути пакети для мережевого аналізу, інструменти моделювання поверхонь, алгоритми пошуку маршруту або плагіни для роботи з інженерними даними. [10] В сукупності це дає можливість збирати телекомунікаційну систему з окремих модулів, що працюють як єдина екосистема. [10]

2.3 Імітаційні методи

Імітаційні методи — це група методів моделювання, які передбачають створення математичної або комп'ютерної моделі складної системи з метою відтворення її поведінки у часі та в різних умовах. [11] Вони широко застосовуються тоді, коли аналітичні методи занадто складні або взагалі неможливі для використання. [11]

Основна ідея полягає у тому, що модель імітує (відтворює) роботу реальної системи, дозволяючи експериментувати з параметрами, перевіряти різні сценарії розвитку подій та прогнозувати результати. [11]

Можуть бути доповнені моделями самонавчання. [11] Використання цифрових двійників мереж дозволяє відтворювати їхню роботу в реальному часі, аналізувати поведінку під різними навантаженнями та прогнозувати якість обслуговування за умови росту кількості абонентів або введення нових сервісів. [11] Це дає змогу не лише перевіряти працездатність архітектури, а й вчасно виявляти «вузькі місця» ще до появи проблем у реальній експлуатації. [11]

Наприклад, припустимо, оператор зв'язку планує розгорнути мережу PON у середньому місті з високою щільністю абонентів. [11] У центрі міста є діловий район, де у робочі години спостерігаються пікові навантаження через відеоконференції та хмарні сервіси, тоді як у житлових кварталах основне навантаження виникає ввечері через потокове відео. [11] Завдання —

спроєктувати мережу так, щоб уникнути перевантажень і водночас не витратити зайвих коштів на надмірне обладнання. [11]

При класичному підході імітаційне моделювання базується на усереднених значеннях трафіку для всього району. Мережа проєктується з розрахунку середніх обсягів навантаження, а перевірка проводиться на кількох типових сценаріях. [11] Це часто призводить до того, що у години пікових навантажень з'являються затримки та втрати пакетів, оскільки модель не відображає нерівномірність розподілу трафіку. [11]

Вдосконалений імітаційний метод використовує реальні дані про споживання з подібних мереж, включаючи часові коливання трафіку та різні профілі користувачів (офісні центри, житлові райони, навчальні заклади). [11] У моделі враховуються не тільки середні, але й пікові значення навантаження з точним розподілом у часі. [11] Це дає змогу на етапі проєктування перевіряти, як мережа поводитиметься у найкритичніші моменти, прогнозувати, коли і де може знадобитися додатковий сплітер чи резервування, а також оптимізувати кількість користувачів на одному порті OLT. [11] У результаті оператор отримує більш стійку мережу, яка одночасно зменшує ризик перевантажень і скорочує надлишкові інвестиції (табл. 2.1). [11]

Таблиця 2.1 – Порівняння класичного і удосконаленого методу

Критерій	Класичний підхід	Вдосконалений підхід
Тип моделювання	Імітаційне, на базі усереднених даних	Імітаційне, на базі реальних, динамічних даних
Джерело даних	Типові профілі трафіку або орієнтовні норми	Реальні профілі трафіку з подібних мереж, Big Data з OLT/ONT/BRAS
Темпоральна деталізація	Переважають статичні сценарії	Динамічне моделювання з урахуванням пікових годин, добових/тижневих коливань
Просторова деталізація	Оцінка навантаження на рівні району	Розділення на мікрорайони / будівлі / профілі користувачів
Тип користувачів	Один узагальнений профіль	Розділення: офіси/ житло / школи / бізнес-центри
Проектування PON-сплітерів	Рівномірне розміщення, однакове навантаження	Оптимізація розміщення на основі прогнозованих точок пікових навантажень
Ризик перевантаження у пік	Високий — затримки, втрати пакетів	Низький — враховано у моделюванні
Оптимізація CAPEX (інвестицій)	Перевитрати або недоінвестування через неточність оцінок	Оптимальні вкладення: обладнання встановлюється там, де справді буде навантаження
Масштабованість/ резервування	Обмежено передбачена	Закладається за потребою на етапі моделювання
Інструменти моделювання	Excel, базові симулятори	Аналітичні платформи (наприклад: AnyLogic, GNS3, Cisco Packet Tracer, власні інструменти провайдерів)
Використання AI/ML	Не передбачено	Можливе прогнозування навантажень за допомогою штучного інтелекту

2.4 Економічні методи

Економічні методи проектування PON (Passive Optical Network) спрямовані на забезпечення оптимального співвідношення між витратами на розгортання мережі та якістю обслуговування абонентів, з урахуванням поточного та прогнозованого попиту. [11] В умовах конкуренції та високих

вимог до стабільності й швидкості з'єднання, оператори зв'язку шукають способи зменшити капітальні (CAPEX) та операційні витрати (OPEX), не втрачаючи при цьому ефективності та масштабованості мережі. [11]

Удосконалюються шляхом інтеграції моделей життєвого циклу мережі та динамічного прогнозування витрат. [11] Це означає, що під час планування враховуються не лише початкові інвестиції, але й витрати на модернізацію, перехід до нових стандартів (наприклад, від GPON до XGS-PON) та потреби у збільшенні пропускної здатності. [11] Використання сценарного аналізу та методів оцінки ризиків дозволяє обрати найстійкішу стратегію розвитку мережі в умовах невизначеності. [11]

Наприка: оператор зв'язку планує розгортання PON-мережі в новому житловому районі на 5000 абонентів. [11] У традиційному підході проектування використовується стандартна модель з фіксованим коефіцієнтом розгалуження (наприклад, 1:64), типовими показниками навантаження та усередненими оцінками вартості обладнання. Інвестиції закладаються одразу на повну інфраструктуру, виходячи з припущення про повне підключення абонентів протягом перших двох років. [11] Такий підхід часто призводить до перевитрат на початковому етапі: частина ресурсів (OLT-порти, сплітери, оптичне волокно) довгий час простоює, а в деяких районах через нерівномірний попит виникає перевантаження або недовантаження мережі. [11] Економічна ефективність проєкту втрачається через низьке використання обладнання та повільну окупність інвестицій. [11]

Удосконалений економічний метод передбачає впровадження динамічного планування на основі реального або прогнозованого попиту. [11] Аналізується забудова району, етапність введення в експлуатацію житлових будинків, і на основі цих даних формується поетапна модель підключень. [11] Це дозволяє розподілити капітальні витрати у часі, наприклад, спочатку встановити лише частину обладнання — лише в тих зонах, де є підтверджений попит. [11] Крім того, враховується тип забудови, щільність населення та очікуване споживання трафіку — що дозволяє використовувати різні коефіцієнти розгалуження (1:16, 1:32, 1:64) залежно від району, і відповідно — уникати як перевантажень, так і зайвих витрат. [11]

Оптимізація мережевої топології здійснюється з використанням геоінформаційних систем (GIS), які дозволяють скоротити довжину кабельних трас, правильно розмістити муфти та сплітери, а також зменшити втрати сигналу та витрати на монтаж. [11] Паралельно використовується автоматизована CRM/OSS-система, яка фіксує реальні підключення та коригує інвестиційний план у режимі реального часу. [11] Це дає змогу гнучко масштабувати мережу, швидко реагувати на зростання попиту в окремих сегментах і підтримувати високий рівень ефективності інфраструктури. [11]

У фінансовому плані вдосконалений підхід забезпечує зменшення початкових інвестицій (наприклад, з 1,2 млн до 600 тис. грн у перший рік), скорочення строку окупності з 5 до 3,5–4 років, збільшення завантаження обладнання на старті та зменшення ризиків "мертвих" вкладень. [11] Крім того, при використанні прогнозованої аналітики або елементів машинного навчання можливо ще точніше оцінювати зони з високим потенціалом трафіку та автоматично оптимізувати мережу відповідно до споживчих профілів. [11] Таким чином, удосконалення економічних методів проектування PON дозволяє досягти кращого балансу між якістю послуг, масштабованістю мережі та економічною доцільністю інвестицій. [11]

2.5 Методи забезпечення надійності

Можуть бути вдосконалені шляхом використання проактивних моделей. [12] Це означає, що замість традиційного резервування застосовується прогнозування ймовірності відмов на основі історичних даних, а також динамічне перепланування маршрутів у разі аварії. [12] Такий підхід дозволяє підвищити рівень доступності послуг без надмірного збільшення капітальних витрат. [12]

У класичному підході до проектування PON-мережі забезпечення надійності зазвичай обмежується базовими технічними рішеннями: якісне обладнання, резервне живлення на вузлових точках, дотримання допустимих довжин оптичного волокна та рекомендованих коефіцієнтів розгалуження. [12] При цьому топологія мережі, як правило, проектується без резервних маршрутів — від OLT до абонентів проходить один оптичний шлях, і будь-яке

пошкодження, наприклад, на ділянці між сплітером і будинком, призводить до повного припинення обслуговування групи користувачів. [12] Відновлення зв'язку можливе лише після виїзду аварійної бригади, що часто займає кілька годин, а в сільських чи важкодоступних районах — і добу. [12] Такий підхід не враховує реальні ризики, які можуть виникнути через зовнішні фактори: будівельні роботи, погодні умови, навмисне пошкодження кабелю тощо. [12] У результаті мережа вважається формально надійною, але фактично залишається вразливою до одноточкових відмов. [12]

На практиці це видно на прикладі одного з регіональних операторів, який розгорнув GPON-мережу в невеликому місті з двома діловими районами та п'ятьма житловими мікрорайонами. [12] За класичним підходом кожен район був підключений до одного OLT, без резервування каналів. [12] Через рік після запуску в одному з мікрорайонів під час прокладки водогону була випадково пошкоджена основна оптична траса. [12] У результаті понад 800 абонентів залишилися без зв'язку на 14 годин. [12] Це спричинило скарги, відтік частини користувачів та штраф від органів регулювання зв'язку за порушення SLA. [12]

Удосконалені методи забезпечення надійності дозволяють уникати таких ситуацій за рахунок гнучкішого та прогнозованого проектування. [12] У тому ж місті, після аварії, оператор провів модернізацію мережі, використовуючи сучасні підходи. [12] Було реалізовано резервування на критичних ділянках за принципом «кільце» — частина вузлів отримала альтернативне підключення до іншого OLT, а також було застосовано фізичну маршрутизацію волокна різними трасами, щоб уникнути залежності від одного кабельного каналу. [12] У ділових центрах, де втрати зв'язку особливо критичні, впровадили подвійну подачу сигналу з автоматичним перемиканням у разі відмови, а також систему моніторингу з автоматичним сповіщенням про втрату сигналу або погіршення якості. [12]

Крім того, була впроваджена система збору статистики в реальному часі, яка на основі аналізу попередніх збоїв виявила, що більшість пошкоджень припадає на два кабельні коридори, які проходять через території з активними будівельними роботами. [12] Після цього було прийнято рішення винести

резервні лінії в обхід цих зон, що значно знизило ризик одночасного пошкодження основного й резервного волокна. [12]

Результатом модернізації стало підвищення загальної доступності мережі до 99,99%, скорочення середнього часу відновлення після збоїв із 6 годин до менш ніж 1 години, а також відсутність серйозних інцидентів протягом наступних двох років. [12] Удосконалений підхід дозволив не лише підвищити технічну стійкість мережі, але й зберегти лояльність абонентів, уникнути фінансових втрат та забезпечити відповідність зобов'язанням щодо якості послуг. [12]

Таким чином, методи забезпечення надійності в PON-мережах, що базуються на резервуванні, прогнозній аналітиці, гнучкій топології та системах моніторингу, забезпечують проактивний підхід до управління мережею та дозволяють операторам зменшити ризики, оптимізувати витрати на обслуговування та гарантувати стабільність послуг незалежно від зовнішніх факторів. [12]

3 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ У PON

Однією з ключових переваг пасивних оптичних мереж є відсутність активних елементів у розподільній частині, що робить їх значно енергоощаднішими порівняно з традиційними мережами доступу на базі мідних кабелів. [13] Проте зростання кількості абонентів, збільшення швидкостей передавання даних і розвиток нових стандартів (XGS-PON, NG-PON2, 25/50G PON) вимагають оптимізації енергоспоживання як на рівні мережевого обладнання, так і в користувацьких пристроях. [13]

3.1 Джерела енергоспоживання в PON

Основними складовими енергоспоживання є:

- оптичний лінійний термінал (OLT) – розташований у центральному вузлі оператора, відповідає за обробку трафіку від усіх підключених абонентів. Через високу щільність портів та інтенсивність роботи саме OLT є найбільш енергозатратним елементом;
- оптичні мережеві вузли (ONU/ONT) – абонентські пристрої, що перетворюють оптичний сигнал у електричний. Оскільки їхня кількість сягає тисяч у межах однієї мережі, сукупне енергоспоживання може бути значним;
- допоміжні системи – охолодження, електроживлення, системи резервування. [13]

3.2 Методи підвищення енергоефективності

Енергоощадні режими ONU:

- Doze Mode – ONU тимчасово знижує активність передавача під час відсутності даних;
- Sleep Mode – пристрій переходить у «сплячий» режим, активуючись лише під час потреби у передачі чи прийомі даних;
- Cyclic Sleep – періодичне пробудження ONU для перевірки наявності трафіку.

Такі механізми стандартизовані у ITU-T G.987.3 та широко впроваджуються у сучасних PON. [13]

Оптимізація енергоспоживання OLT:

- використання динамічного керування живленням портів, які активуються лише за потреби;
- застосування модульних рішень з можливістю масштабування;
- інтелектуальне балансування навантаження між лінійними картами.

[13]

Інтеграція з концепцією Green ICT:

- використання відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі, мікрівітрові установки) для живлення вузлів;
- перехід до обладнання з низьковольтним живленням і високоефективними блоками перетворення. [13]

Зниження енергоспоживання не повинно погіршувати параметри QoS. [13] Наприклад, надмірне використання Sleep Mode може призвести до збільшення затримок при відновленні передачі. [13] Тому сучасні алгоритми керування енергоспоживанням враховують рівень завантаження мережі, тип сервісів (VoIP, IPTV, IoT) та пріоритетність трафіку. [13]

Перспективи розвитку:

- AI-керування енергоспоживанням – застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування навантаження і динамічного переходу вузлів у енергоощадні стани;
- Green PON – комплексний підхід до проектування енергоефективних архітектур, який враховує як вибір обладнання, так і оптимізацію топології мережі;
- інтеграція з Smart Grid – взаємодія PON із «розумними» енергетичними мережами для балансування навантажень у пікові періоди. [13]

4 ОГЛЯД ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕРЕЖ PON

Для розгляду було обрано GIS-орієнтовані методи проектування мереж. Геоінформаційні системи є фундаментальним інструментом для сучасного проектування інженерної інфраструктури, зокрема волоконно-оптичних мереж. Їхня ефективність зумовлена можливістю поєднання просторових даних з технічними характеристиками мережі, що дозволяє виконувати комплексний аналіз місцевості, оптимізувати прокладення трас кабелю та проводити технічно обґрунтовані розрахунки.

У телекомунікаційній галузі ГІС застосовується для:

- створення просторових моделей мереж;
- оцінки довжин кабельних ліній;
- вибору оптимальних маршрутів з урахуванням рельєфу, забудови, інженерних обмежень;
- управління активами та документування мережі.

Одним із найбільш поширених інструментів відкритого програмного забезпечення для цих завдань є QGIS.

4.1 Гіпотеза про QGIS

У сучасних умовах розвитку телекомунікаційних технологій особливого значення набувають методи підвищення ефективності проектування оптичних мереж доступу, зокрема мереж типу PON. [14] Традиційні підходи, що ґрунтуються переважно на використанні САД-середовищ і значному обсязі ручної праці, часто не забезпечують належного рівня точності, адаптивності та масштабованості. [14] У зв'язку з цим постає необхідність впровадження інтегрованих геоінформаційних технологій, здатних об'єднати просторові дані, інженерні розрахунки та автоматизацію технічних процедур. [14]

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що комплексне застосування QGIS та PyQGIS у поєднанні з методами геоінформаційного аналізу, імітаційного моделювання, економічної оцінки та інженерних методик забезпечення

надійності дозволяє суттєво підвищити ефективність і точність проектування PON-мереж. [14] Передбачається, що таке інтегроване середовище дає змогу скоротити витрати людського ресурсу та фінансові затрати, підвищити технологічну надійність та прискорити підготовку проєктної документації без погіршення технічних характеристик мережі. [14] Наукове обґрунтування цієї гіпотези базується на аналізі функціональних можливостей геоінформаційних систем, які дозволяють виконувати широке коло завдань — від просторового аналізу до автоматичного формування технічних специфікацій. [14] Однією з ключових переваг PyQGIS є можливість автоматизації повторюваних і ресурсомістких операцій, що традиційно виконуються інженером вручну. [14] До таких операцій належать кластеризація будівельної інфраструктури, оцінювання потенційної щільності абонентського навантаження, визначення геометрично раціональних місць для встановлення спліттерів і оптичних муфт, а також оптимізація маршрутів прокладання ліній зв'язку. [14] Автоматизація цих процесів зменшує вплив суб'єктивних чинників, знижує ймовірність проєктних помилок і дозволяє значно скоротити час виконання проєктних етапів. [14]

Важливим елементом обґрунтування виступає використання QGIS як середовища інтеграції геопросторових даних. [14] GIS-технології забезпечують можливість поєднання просторових характеристик території — рельєфу, структури забудови, можливих трас прокладання кабелів, розташування існуючих комунікацій — із техніко-експлуатаційними параметрами PON-мереж, зокрема допустимими довжинами оптичних ліній, нормованими значеннями загасання та вимогами до балансування оптичного навантаження. [14] Це дозволяє формувати технічно та просторово обґрунтовані топології мережі, що значно підвищує їхню експлуатаційну надійність. [14] На відміну від традиційних CAD-рішень, GIS-середовище враховує реальний стан місцевості, що робить проєктні рішення більш точними та адаптивними до зовнішніх умов. [14]

4.2 Комбінація QGIS та PyQGIS

В сучасній телекомунікаційній галузі поєднання QGIS та Python-модуля PyQGIS перетворилося на ефективний інструмент для напівавтоматизованого проектування мереж доступу. [14] QGIS, як геоінформаційна система з відкритим кодом, надає широкий набір можливостей для аналізу та візуалізації просторових даних, а вбудоване середовище PyQGIS забезпечує програмне керування цими функціями. [14] Внаслідок цього формується інтегрований інструментарій, який дозволяє не лише опрацювати геодані, а й виконувати складні інженерні розрахунки, що традиційно потребували залучення спеціалізованого програмного забезпечення. [14]

У практиці проектування мереж доступу широкого використання набули алгоритми автоматизованої кластеризації будівельного фонду. [14] За допомогою PyQGIS можна реалізувати аналіз просторової щільності, відстаней між будівлями, прогнозу кількості потенційних абонентів та інших параметрів. [14] Зібрані дані дозволяють формувати обґрунтовані кластери обслуговування, у межах яких надалі визначається логіка мережевої топології. [14] Такий підхід значно підвищує ефективність підготовчого етапу проектування, оскільки автоматизація замінює ручну аналітику, прискорює процес і мінімізує ймовірність помилкової класифікації об'єктів. [14]

Важливою складовою інженерних розрахунків є визначення оптимального розташування спліттерів та інших мережевих елементів пасивної оптичної інфраструктури. [14] Використовуючи механізми PyQGIS, можливо створити алгоритми, які враховують просторове положення будівель, допустимі довжини волоконно-оптичних ліній, норми загасання, вимоги до балансування навантаження та обмеження топологій GPON/XGS-PON. [14] На основі цих даних система автоматично пропонує точки встановлення спліттерів, муфт та комутаційних пристроїв, забезпечуючи оптимальну конфігурацію мережі з погляду ресурсомісткості та технічної відповідності. [14]

Наступним етапом є формування структурних схем мережі, які відображають взаємозв'язки між елементами інфраструктури — від центрального обладнання OLT до кінцевих абонентів. PyQGIS дозволяє

генерувати такі схеми на основі геометричних і атрибутивних даних, що зберігаються у проєкті. [14] Автоматичне побудування дерев підключень, таблиць волокон, відомостей кабельних ліній та схем портової взаємодії істотно знижує трудомісткість документування, оскільки відпадає необхідність створення схем вручну. [14]

Завдяки інтеграції QGIS із зовнішніми бібліотеками Python додатково реалізується автоматизація генерації технічної документації. [14] Інструменти PyQGIS здатні формувати вихідні матеріали у форматах PDF, DOCX, XLSX, що включають плани мережі, специфікації обладнання, звіти про протяжності кабельних траєкторій, відомості матеріалів та інші документи, необхідні для повноцінного проєкту. [14] Застосування шаблонів значно спрощує стандартизацію вихідних документів у межах підприємства та забезпечує відповідність нормам технічного регламенту. [14]

Таким чином, використання QGIS у поєднанні з PyQGIS забезпечує комплексний підхід до проєктування телекомунікаційних мереж, в якому GIS-аналітика органічно поєднується з інженерними розрахунками. Такий підхід підвищує оперативність розробки, знижує ймовірність помилок, забезпечує уніфікацію проєктної документації та дозволяє створювати економічно обґрунтовані та технічно оптимізовані рішення. [14]

4.3 Комбінація QGIS з іншими вдосконаленими методами проєктування.

Комбінація QGIS із імітаційними, економічними методами та методами забезпечення надійності дозволяє створити комплексний підхід до проєктування телекомунікаційних мереж, що охоплює як технічні, так і економічні та експлуатаційні аспекти. [14]

Першим етапом є використання імітаційних методів. Дані, отримані в QGIS, включаючи рельєф місцевості, розташування будівель, дороги, щільність населення та існуючу інфраструктуру, використовуються для побудови моделей роботи мережі. [14] Імітаційні моделі дозволяють прогнозувати продуктивність мережі в різних сценаріях, враховуючи можливі навантаження на вузли, відмови елементів та варіанти прокладання кабелів. Завдяки цьому можна оптимально

визначити розташування оптичних вузлів, прокладку магістральних та розподільчих ліній, а також передбачити проблемні ділянки, що забезпечує зниження технічних ризиків ще на етапі планування. [14]

Другим етапом є застосування економічних методів. На основі геопросторових даних з QGIS проводиться оцінка капітальних та експлуатаційних витрат, визначення пріоритетних районів для будівництва мережі та прогнозування окупності інвестицій. [14] Використання економічних методів дозволяє оцінити доцільність реалізації проекту в конкретних районах, оптимізувати розподіл фінансових ресурсів та обрати найбільш ефективні технологічні рішення. [14] Це забезпечує економічну обґрунтованість проекту і дозволяє планувати етапність його реалізації, враховуючи як фінансові, так і технічні обмеження. [14]

Третім етапом є інтеграція методів забезпечення надійності. На основі топології мережі та розташування її елементів, отриманих з QGIS, проводиться аналіз ймовірності відмов та планування резервних маршрутів. [14] Це дозволяє підвищити стійкість мережі до аварій та непередбачених ситуацій, забезпечити безперервність сервісу для користувачів і мінімізувати вплив можливих відмов на роботу мережі. [14] Використання методів надійності дозволяє також визначати критичні точки мережі, де необхідне додаткове резервування або посилення контролю за станом обладнання. Якщо подати це у вигляді блок-схеми, то вона буде такою (рис. 4.1). [14]



Рисунок 4.1 – Блок схема процесу комбінації методів

У результаті поєднання QGIS із імітаційними, економічними методами та методами забезпечення надійності формується комплексний підхід до проектування телекомунікаційної мережі. [14] Такий підхід забезпечує точне і ефективне розташування вузлів та кабелів з урахуванням географічних умов, економічну обґрунтованість проєкту та високу стійкість мережі до відмов, що є важливим фактором для створення сучасних надійних та економічно ефективних телекомунікаційних систем. [14]

ВИСНОВОК

У даній дипломній роботі було досліджено процес проектування пасивних оптичних мереж (PON) з використанням сучасних геоінформаційних систем та програмного забезпечення QGIS у поєднанні з мовою програмування Python через PyQGIS. Робота охоплює як теоретичні аспекти функціонування PON, так і практичні методи їх моделювання та оптимізації на реальних територіях. В ході дослідження було проведено аналіз ключових компонентів мережі, їхніх функцій та взаємозв'язків, що дозволило сформулювати цілісне уявлення про структуру та принципи роботи сучасних оптичних телекомунікаційних систем.

Особлива увага приділялася використанню можливостей QGIS для обробки геопросторових даних, визначення оптимальних трас прокладки оптичних кабелів та вибору місць розташування спліттерів з урахуванням щільності забудови та наявної інфраструктури. Завдяки інтеграції QGIS з PyQGIS вдалося автоматизувати процес кластеризації будинків, формування структурних схем мережі та підготовки технічної документації. Це дозволило значно скоротити час виконання проектних робіт та підвищити точність планування, що є важливим для забезпечення надійності та ефективності мережі.

Практична частина роботи демонструє можливість створення наочних карт та схем, які відображають реальне розташування мережевих елементів і дозволяють здійснювати подальше керування та модернізацію мережі. Результати виконаного дослідження підтверджують ефективність використання сучасних геоінформаційних технологій та програмних інструментів для комплексного проектування оптичних мереж і можуть бути застосовані у реальних умовах телекомунікаційних компаній для оптимізації витрат, підвищення продуктивності та надійності мережі.

В цілому, виконана робота дозволяє зробити висновок, що застосування інтегрованих методів геоінформаційного аналізу та автоматизації проектування забезпечує високий рівень точності та ефективності при створенні пасивних оптичних мереж і є перспективним напрямком розвитку сучасних телекомунікаційних технологій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. FSAN Roadmap | FSAN. FSAN | Full Service Access Network. URL: <https://www.fsan.org/roadmap> (дата звернення: 15.10.2025).
2. Володимир. Технологія GPON. Український телекомунікаційний портал. URL: <https://portaltele.com.ua/news/technology/gpon.html> (дата звернення: 15.10.2025).
3. What Is Passive Optical Networking (PON)? GPON vs. EPON - Huawei. Huawei. URL: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/PON.html> (дата звернення: 15.10.2025).
4. What is GPON?. Router-switch.com. URL: <https://www.router-switch.com/faq/what-is-gpon.html> (дата звернення: 15.10.2025).
5. Jim Hayes. The advantages of passive optical networks. Electrical Contractor. URL: <https://www.ecmag.com/magazine/articles/article-detail/integrated-systems-advantages-passive-optical-networks> (дата звернення: 15.10.2025).
6. GPON vs. EPON: a cost comparison. Home | Lightwave. URL: <https://www.lightwaveonline.com/fttx/pon-systems/article/16648312/gpon-vs-epon-a-cost-comparison> (дата звернення: 15.10.2025).
7. 5 key facts about PON and the evolution of GPON technology. Pro Optix. URL: <https://www.prooptix.com/news/gpon-technology-fact> (дата звернення: 15.10.2025).
8. Passive optical network (PON) design and managing 101 - splice.me. splice.me. URL: <https://splice.me/blog/passive-optical-network-pon-design-and-managing-101> (дата звернення: 23.10.2025).
9. The FOA reference for fiber optics - fiber to the home PON types -. Home - The Fiber Optic Association. URL: <https://www.thefoa.org/tech/ref/appln/FTTH-PON.html> (дата звернення: 23.10.2025).
10. A comprehensive analysis of methods for improving and estimating energy efficiency of passive and active fiber-to-the-home optical access networks – PMC. PMC Home. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12526558> (дата звернення: 23.10.2025).

11. DSpace. DSpace :: ELAKPI :: Репозитарій КПІ ім. Ігоря Сікорського.
URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15598/1/Konspekt_lekciy_Imit_modely_r_syst_process\(CHANGED\).pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15598/1/Konspekt_lekciy_Imit_modely_r_syst_process(CHANGED).pdf) (дата звернення: 10.12.2025).

12. ХНУРЕ | ХНУРЕ - Харківський національний університет радіоелектроніки. URL: https://nure.ua/wpcontent/uploads/2023/pi_11_vol_1.pdf (дата звернення: 10.12.2025).

13. Huawei Technical White Paper – “Energy Saving Technologies in PON Access Networks”. URL: <https://e.huawei.com/en/documents/solutions/enterprise-optical-network/06128ee0848f46318d5a0609e5215d1a> (дата звернення: 10.12.2025)

14. Using QGIS for FTTH/GPON network planning due to the implementation European Digital Agenda · QGIS Web Site. Spatial without Compromise · QGIS Web Site. URL: https://qgis.org/project/case-studies/poland_ffth/ (дата звернення: 28.11.2025).

15 Костромицький А.І., Хан М.О. Вдосконалення методів проектування мереж (PON) / Проблеми інформатизації: тези доповідей тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції (Баку – Харків – Бельсько-Бяла, 27-28 листопада 2025 р.) Том 1: секції 1, 2 / Харків, Impress, 2025. – 136 с., С. 83-84.
<https://doi.org/10.32620/PI.25.t1>