ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Створення пасивної оптичної мережі котеджного містечка з використанням технології автоматизованого проєктування»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації і радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

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

_____ Сергій ВИЙТІВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)*

Виконав: здобувач вищої освіти
студент гр. ТСДМ-61
Сергій ВИЙТІВ

Керівник: Марков С.
к.т.н., доцент *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Рецензент:

_____ _____
(науковий ступінь, вчене звання) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Телекомунікації і радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Вийтіву Сергію Тарасовучи
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Створення пасивної оптичної мережі котеджного містечка з використанням технології автоматизованого проєктування,
керівник кваліфікаційної роботи Градобоєва Н.В., к.т.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від « » 2025 р. № .

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1) рекомендації міжнародної спілки електрозв'язку щодо пасивних оптичних мереж доступу;
2) відомості про сучасний стан оптичних мереж доступу (матеріали періодичних науково-технічних видань);
3) дані про особливості проєктування та розрахунку пасивних оптичних мереж доступу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1) аналіз оптичних технологій доступу;
2) оптичні волокна та обладнання для пасивних оптичних мереж доступу;
3) моделювання та аналіз оптичних мереж доступу;
4) основні проєктні задачі пасивних оптичних мереж доступу та можливості їх автоматизації;
5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: ___презентація на ___слайдах_____

6. Дата видачі завдання «_01_» _жовтня_ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Вступ	05.10.2025	
	Аналіз оптичних технологій доступу	10.10.2025	
	Оптичні волокна, кабелі та обладнання для пасивних оптичних мереж доступу	15.10.2025	
	Моделювання та аналіз оптичних мереж доступу	30.10.2025	
	Основні проєктні задачі пасивних оптичних мереж доступу	15.11.2025	
	Можливості автоматизації рішення проєктних задач пасивних оптичних мереж доступу	10.12.2025	
	Висновки та оформлення роботи	25.12.2025	

Здобувач вищої освіти _____ Сергій ВИЙТІВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник роботи _____ МАРКОВ С.
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: с. 72 , рис. 11, табл. 7, 36 джерела.

Мета роботи - розробити проєкт пасивної оптичної мережі (PON) для котеджного містечка із застосуванням технології GPON та спеціалізованих засобів автоматизованого проєктування, що забезпечують оптимальне використання ресурсів, високу надійність та економічну ефективність.

Об’єкт дослідження - процес побудови оптичних мереж доступу в районах приватної забудови.

Предмет дослідження - методи та засоби автоматизації проєктування мереж GPON.

Короткий зміст роботи: У роботі досліджено принципи побудови сучасних мереж доступу, проаналізовано стандарти ITU-T серії G.984 та архітектуру GPON. Обґрунтовано вибір програмного комплексу «Rural Network Configurator» для автоматизації інженерних розрахунків. У практичній частині розроблено структурну схему мережі для котеджного містечка на 25 абонентів з використанням каскадної топології 1 × 4 → 1 × 16. Виконано трасування ліній у кабельній каналізації, автоматизований розрахунок бюджету оптичних втрат та сформовано специфікацію обладнання.

Результати розрахунків підтвердили відповідність спроєктованої мережі класу ODN Class B+: розрахункові сумарні втрати становлять 22,46 дБ при допустимому ліміті 28 дБ, що забезпечує експлуатаційний запас потужності 6,04 дБ. Здійснено техніко-економічне обґрунтування, яке показало доцільність обраного рішення (орієнтовна вартість обладнання на одного абонента складає близько 4300 грн).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: GPON, ПАСИВНА ОПТИЧНА МЕРЕЖА, АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ, FTTH, ОПТИЧНИЙ БЮДЖЕТ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА ІНФРАСТРУКТУРА.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 72 pages, 11 figures, 7 tables, 36 sources.

The purpose of the work is to develop a project of a passive optical network (PON) for a cottage settlement using GPON technology and specialized automated design tools, ensuring optimal resource use, high reliability, and economic efficiency.

The object of research is the process of building optical access networks in private development areas.

The subject of research is methods and tools for automating GPON network design.

Summary of the work: The paper investigates the principles of constructing modern access networks, analyzes the ITU-T G.984 series standards and GPON architecture. The choice of the "Rural Network Configurator" software complex for automating engineering calculations is justified.

In the practical part, a structural scheme of the network for a cottage settlement of 25 subscribers was developed using a cascading topology $1 \times 4 \rightarrow 1 \times 16$. Line tracing in cable ducts was performed, automated calculation of the optical loss budget was carried out, and an equipment specification was formed.

The calculation results confirmed the compliance of the designed network with ODN Class B+: the calculated total losses are 22.46 dB with a permissible limit of 28 dB, providing an operational power margin of 6.04 dB. A technical-economic justification was carried out, showing the feasibility of the chosen solution (the estimated cost of equipment per subscriber is about 4300 UAH).

KEYWORDS: GPON, PASSIVE OPTICAL NETWORK, AUTOMATED DESIGN, FTTH, OPTICAL BUDGET, TELECOMMUNICATION INFRASTRUCTURE.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Вийтів С. Т. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Телекомунікації і радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні мережі
(назва)
на тему: « Створення пасивної оптичної мережі котеджного містечка з використанням технології автоматизованого проєктування».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Вийтів С.Т. під час написання роботи проявив себе як вдумливий та допитливий фахівець, показав гарну теоретичну підготовку. За короткий час їм було опрацьовано значну кількість літератури з проблем проєктування пасивних оптичних мереж доступу та проведені необхідні розрахунки. Працюючи над завданнями, які доручалися керівником роботи, студент проявив ініціативу творчість і спроможність до інженерної праці.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Вийтіва С.Т. на оцінку « відмінно » та присвоїти йому кваліфікацію магістр з телекомунікацій та радіотехніки.

Керівник роботи _____ _____
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Вийтів С.Т. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього рівня магістра

здобувача вищої освіти Вийтіва Сергія Тарасовича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Створення пасивної оптичної мережі котеджного містечка з використанням технології автоматизованого проєктування»

Актуальність.

Потреба в високошвидкісних лініях доступу є дуже високою. Це стосується як побудови нових ліній, так і реконструкції старих з перетворенням на гібридні. Вибір технології проєктування мережі доступу є дуже важливою задачею операторів, тому тема, обрана для розробки є актуальною.

Позитивні сторони.

1. Проведений аналіз стандартів технологій оптичного доступу, показані переваги технології сучасного Ethernet для мереж доступу.
2. Проведений аналіз пасивних оптичних мереж доступу.
3. Розроблений проєкт пасивної оптичної мережі в сільському районі застосуванням методики автоматизованого проєктування.
4. Всі розділи роботи виконані на високому рівні; пояснювальна записка написана чітко і зрозуміло, графічна частина оформлена з використанням комп'ютера.

Недоліки.

1. Не розглянуті питання експлуатації мереж доступу.
2. Не вказане які типи волокон можуть бути застосовані при використанні сучасних технологій доступу

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна магістерська робота заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Вийтів С.Т. заслуговує присвоєння кваліфікації:*
Магістр з телекомунікацій та радіотехніки.

Рецензент: _____ _____
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*
_____
(науковий ступінь, вчене звання)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВСТУП .....

1 Теоретичні основи побудови пасивних оптичних мереж 11

1.1 Еволюція мереж доступу та поява PON 11

1.2 Класифікація технологій PON 13

1.3 Архітектура та принцип дії GPON 15

1.4 Огляд сучасних стандартів ITU-T 19

2 Автоматизація процесу проєктування пасивних оптичних мереж 23

2.1 Автоматизація процесу проєктування 23

2.2 Порівняння інструментів автоматизованого проєктування PON-мереж ... 28

2.3 Вибір програмного засобу для проєкту... 35

3 Проєктування пасивної оптичної мережі котеджного містечка 31

3.1 Проєктування GPON-мережі для котеджного містечка 31

3.2 Топологія мережі GPON 36

3.3 Розрахунок оптичного бюджету та аналіз енергетичних параметрів 38

3.4 Побудова схеми мережі 41

3.5 Специфікація обладнання та матеріалів 45

3.6 Техніко-економічне обґрунтування проєкту 47

3.7 Порівняння проєктного рішення з альтернативними варіантами 51

ВИСНОВКИ .....

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....

ПРЕЗЕНТАЦІЯ .....

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Позначення	Розшифровка / Назва	Назва українською
PON	Passive Optical Network	Пасивна оптична мережа
GPON	Gigabit-capable PON	Гігабітна пасивна оптична мережа
OLT	Optical Line Terminal	Оптичний лінійний термінал
ONT	Optical Network Terminal	Абонентський оптичний термінал
ONU	Optical Network Unit	Оптична мережева одиниця
ODN	Optical Distribution Network	Оптична розподільча мережа
OMCI	Optical Management and Control Interface	Інтерфейс керування абонентами
FTTx	Fiber To The x	Оптичне волокно до певної точки
FTTH	Fiber To The Home	Волокно до будинку
FTTB	Fiber To The Building	Волокно до будівлі
SMF	Single Mode Fiber	Одномодове волокно
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Спектральне ущільнення каналів
TDM	Time Division Multiplexing	Часовий поділ каналів
dB	Decibel	Децибел (вимір втрат/підсилення)
dBm	Decibel-milliwatt	Потужність відносно 1 мВт
QoS	Quality of Service	Якість обслуговування
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation	Динамічний розподіл смуги
OAM	Operations, Administration and Maintenance	Експлуатаційне керування мережею
CAPEX	Capital Expenditures	Капітальні витрати
OPEX	Operating Expenditures	Експлуатаційні витрати
PLC	Planar Lightwave Circuit	Планарний оптичний сплітер
AES	Advanced Encryption Standard	Стандарт симетричного шифрування
TDMA	Time Division Multiple Access	Множинний доступ із часовим поділом
XGS-PON	10-Gigabit-capable Symmetric PON	Симетрична пасивна оптична мережа 10 Гбіт/с
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector	Сектор стандартизації телекомунікацій МСЕ
ODF	Optical Distribution Frame	Оптичний розподільчий крос
GIS	Geographic Information System	Геоінформаційна система

ВСТУП

У роботі розглядається проєктування пасивної оптичної мережі доступу для котеджного містечка з використанням технології GPON (Gigabit Passive Optical Network) та сучасних засобів автоматизованого проєктування. Актуальність теми зумовлена потребою у високошвидкісному та надійному фіксованому доступі в житлових районах малої щільності, де оптичні мережі забезпечують значний запас пропускної здатності, низькі затримки та високу енергоефективність у порівнянні з мідними технологіями.

Мета роботи - розробити модель GPON-мережі котеджного містечка із застосуванням засобів автоматизованого проєктування, з оцінкою оптичного бюджету та формуванням специфікації.

Завдання роботи:

проаналізувати принципи побудови PON і сучасні стандарти ITU-T серій G.984/G.9807.1;

порівняти програмні інструменти для САПР мереж доступу й обґрунтувати вибір;

побудувати топологію GPON (OLT→1×4→1×16→ONT), виконати розрахунок оптичного бюджету та сформувати специфікацію.

Об’єкт дослідження - процес побудови мереж доступу на базі пасивних оптичних технологій.

Предмет дослідження - методи та засоби автоматизації проєктування GPON-мереж (AutoCAD, OptiSystem, FTTH/GPON конфігуратори тощо).

Наукова новизна полягає в поєднанні класичного розрахунку оптичного бюджету з використанням САПР для підвищення точності та відтворюваності проєктних рішень.

Практичне значення - побудована модель може слугувати шаблоном для аналогічних об’єктів котеджної забудови з можливістю масштабування та подальшої модернізації до XG(S)-PON.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Еволюція мереж доступу та поява PON

Розвиток телекомунікаційних систем завжди визначався зростанням вимог до швидкості, стабільності та якості передавання інформації. На ранніх етапах користувачі обмежувалися передаванням голосових сигналів у межах телефонної мережі загального користування (PSTN), яка повністю відповідала потребам свого часу. Однак стрімке поширення мережі Інтернет, поява мультимедійних сервісів і збільшення кількості цифрових пристроїв сформували якісно нові вимоги до мереж доступу, що традиційні технології вже не могли забезпечити на належному рівні.

Першим етапом цифрової трансформації стали модемні технології dial-up, які дозволяли передавати дані через стандартну мідну телефонну лінію, але мали критично низькі швидкості. Підвищення продуктивності стало можливим лише завдяки впровадженню технологій xDSL, що використовували розширений частотний спектр мідної пари. ADSL та VDSL забезпечили значно вищу пропускну здатність, і протягом певного часу вони залишалися основним способом широкосмугового доступу. Однак фізичні обмеження мідного середовища - затухання на великих відстанях, чутливість до електромагнітних перешкод, залежність швидкості від довжини лінії - визначили їхню неможливість задовольнити зростання трафіку у довгостроковій перспективі [1].

Подальша еволюція призвела до формування гібридних оптико-коаксіальних мереж (HFC). Використання оптичного волокна у магістральних сегментах забезпечувало високу пропускну здатність, тоді як коаксіальна ділянка дозволяла зберегти існуючу інфраструктуру кабельних мереж. Але навіть за покращених характеристик коаксіальні сегменти залишалися вразливими до шумів, мали обмежений ресурс модернізації та вимагали використання активних підсилювачів, що збільшувало енергоспоживання та підвищувало ймовірність відмов обладнання. Для мереж із великою кількістю абонентів це створювало

суттєві експлуатаційні труднощі, а стабільність роботи залежала від стану кожної окремої ділянки коаксіалу [2].

На цьому тлі постала концепція FTTx - логічний перехідний етап від мідних мереж до повністю оптичних систем доступу. Схеми FTTC, FTTB та FTTdp передбачали поступове скорочення мідної ділянки та підведення оптичного волокна ближче до абонента. Але саме FTTH стала ключовою точкою еволюції: повне заміщення мідного середовища оптичним дозволило усунути основні обмеження старих технологій і забезпечити стабільне високошвидкісне передавання сигналу незалежно від відстані. Саме з FTTH пов’язане масштабне розгортання оптичного доступу операторами, що підтверджується щорічними оглядами ринку FTTH/B [3].

Проте навіть FTTH не відповіла на всі інженерні виклики. Залишалося питання енергоефективності та надійності: будівництво мережі з активними елементами в розподільчих вузлах вимагало живлення, технічного обслуговування та збільшувало кількість потенційних точок відмови. Для вирішення цього завдання сформувалася ідея пасивної оптичної мережі - архітектури, в якій між центральним вузлом і абонентом використовуються лише пасивні елементи. PON базується на застосуванні оптичних сплітерів, що не потребують живлення, а весь інтелект і керування зосереджені в центральному обладнанні оператора. Це дозволяє будувати мережі зі значним радіусом дії без сигналізуючих підсилювачів, різко знижує експлуатаційні витрати та забезпечує високу надійність навіть у складних умовах місцевості [4, 5].

У результаті PON стала фундаментом сучасних FTTH-мереж. Зростання вимог до пропускної здатності, поява високоякісного потокового відео, розвиток хмарних сервісів, збільшення кількості IoT-пристроїв та необхідність забезпечення стабільних каналів зв’язку для інтерактивних застосунків - усе це визначило природний перехід до повністю оптичної інфраструктури. Нині пасивні мережі є базовою технологією при будівництві мереж доступу як у міській інфраструктурі, так і в приватному секторі. Їхня універсальність, масштабованість

і майже необмежений потенціал модернізації роблять PON найперспективнішим напрямом розвитку телекомунікаційних систем на найближчі десятиліття [3, 6].

Підсумовуючи, еволюція мереж доступу - від PSTN і xDSL до FTTH і PON - демонструє логічний, послідовний рух телекомунікацій від електричних до оптичних середовищ передавання. Поява пасивних оптичних мереж стала відповіддю на сукупність технологічних обмежень попередніх поколінь і визначила новий стандарт побудови високошвидкісних, енергоефективних і надійних мереж доступу.

1.2 Класифікація технологій PON

Після формування концепції повністю оптичного доступу FTTH та усвідомлення обмежень традиційних мереж постала необхідність створення технологій, які б максимально ефективно використовували потенціал волоконно-оптичного середовища. Пасивні оптичні мережі (PON) стали відповіддю на ці виклики, поєднавши високу пропускну здатність, надійність та низькі експлуатаційні витрати. На сучасному етапі розвитку телекомунікацій PON не є єдиною технологією, а являє собою ціле сімейство стандартів, які відрізняються швидкісними характеристиками, методами організації доступу, механізмами інкапсуляції даних та можливостями подальшої еволюції мережі [5, 7].

Класифікація технологій PON є важливим теоретичним етапом, оскільки вона дозволяє обґрунтовано підійти до вибору технології доступу залежно від типу забудови, кількості абонентів, прогнозованого навантаження та вимог до якості обслуговування. Основними критеріями класифікації є пропускна здатність у низхідному та висхідному напрямках, спосіб розподілу середовища між абонентами, тип транспортного протоколу, сумісність з існуючою оптичною розподільчою мережею (ODN) та можливість модернізації без заміни кабельної інфраструктури [5, 7].

Однією з перших реалізованих технологій у межах концепції PON стала EPON (Ethernet Passive Optical Network), стандартизована організацією IEEE в

межах стандарту IEEE 802.3ah («Ethernet in the First Mile»). Її ключовою особливістю є використання Ethernet як базового транспортного протоколу, що спрощує інтеграцію з існуючими мережами передачі даних та знижує вартість впровадження [8].

EPON забезпечує швидкість близько 1 Гбіт/с у низхідному та висхідному напрямках, що було достатнім для початкових етапів розвитку FTTH-рішень. Проте зі зростанням кількості абонентів і переходом до мультимедійних та інтерактивних сервісів ці параметри почали обмежувати можливості масштабування та підтримки якості обслуговування, що й зумовило активне впровадження GPON та подальших поколінь PON-технологій [8, 5, 2].

Зі зростанням попиту на високошвидкісний доступ та симетричні канали передавання даних було розроблено технології наступного покоління - XG-PON і XGS-PON. XG-PON забезпечує швидкість до 10 Гбіт/с у низхідному напрямку та 2,5 Гбіт/с у висхідному, залишаючись асиметричною технологією, орієнтованою на модернізацію існуючих GPON-мереж. XGS-PON, своєю чергою, реалізує симетричний режим передавання даних зі швидкістю 10/10 Гбіт/с і розглядається як базова технологія для перспективних FTTH-мереж із високим рівнем навантаження, включаючи системи відеоспостереження, хмарні сервіси та інтелектуальні житлові комплекси.

Важливою особливістю сучасних технологій PON є їхня сумісність на рівні оптичної розподільчої мережі. Це означає, що перехід від GPON до XG-PON або XGS-PON може здійснюватися без заміни оптичних кабелів і пасивних елементів, що суттєво знижує капітальні витрати операторів та підвищує економічну доцільність побудови FTTH-мереж. Такий підхід особливо актуальний для приватного сектору та котеджних містечок, де довжини ліній значні, а модернізація інфраструктури повинна бути поетапною [7, 9, 10, 11, 6].

Порівняльні характеристики основних сучасних технологій пасивних оптичних мереж наведено в таблиці 1.1 [8, 5, 11, 9, 10]. Вона дозволяє узагальнити відмінності між EPON, GPON, XG-PON і XGS-PON та наочно показати еволюцію параметрів продуктивності й функціональності.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика основних технологій PON [8, 5, 11, 9, 10].

Характеристика	Стандарти пасивних оптичних мереж доступу				
	BPON	PON/GEPON	XG-PON	XGS-PON	GPON
Стандарт	ITU-T G.983	IEEE 802.3ah	ITU-T G.987.x	ITU-T G.9807.1	ITU-T G.984.x
Швидкість (Down/Up), Гбіт/с	0,622/0,155	1,25/1,25	10/2,5	9,953/9,953	2,488/1,244
Протокол 2-го рівня	ATM	Ethernet	GEM	GEM (Ethernet)	GEM
Довжини хвиль (Down/Up), нм	1490/1310	1490/1310	1577/1270	1577/1270	1490/1310
Макс. коефіцієнт поділу	1:32	1:32 (рекомендовано)	1:128 (макс.)	1:128 (макс.)	1:64 (типово), 1:128 (макс.)
Основна перевага	Перший стандарт	Простота та дешевизна	10 Гбіт/с (Down) та еволюційна модернізація	Симетрична швидкість 10 Гбіт/с	Баланс швидкості, масштабованості та QoS

Аналіз таблиці 1.1 свідчить, що технологія GPON забезпечує оптимальне співвідношення між вартістю впровадження, пропускною здатністю та масштабованістю, що робить її найбільш доцільною для побудови мереж доступу в котеджних містечках. У той же час XGS-PON розглядається як перспективний напрям подальшого розвитку мережі без необхідності повної реконструкції оптичної інфраструктури [12, 9, 10].

Таким чином, класифікація технологій пасивних оптичних мереж дозволяє сформувати теоретичну основу для обґрунтованого вибору технології доступу. Отримані висновки є вихідними даними для подальшого аналізу архітектури та принципів дії GPON, які будуть детально розглянуті у наступному підрозділі.

1.3 Архітектура та принцип дії GPON

Технологія GPON (Gigabit-capable Passive Optical Network) є найбільш поширеним і технологічно зрілим рішенням для побудови пасивних оптичних

мереж доступу. Вона стандартизована Міжнародним союзом електрозв'язку в межах серії рекомендацій ITU-T G.984 і призначена для надання широкосмугового мультисервісного доступу з високою пропускною здатністю, гарантованими параметрами якості обслуговування та низькими експлуатаційними витратами . Архітектура GPON базується на принципі «точка - багатоточка», що дозволяє одному оптичному порту OLT обслуговувати велику кількість абонентів через пасивну розподільчу мережу [5, 13].

Загальна структурна схема пасивної оптичної мережі GPON включає три основні функціональні складові: оптичний лінійний термінал (OLT), оптичну розподільчу мережу (ODN) та абонентські термінали ONU/ONT. Типова архітектура такої мережі наведена на рис. 1.1. OLT розташовується у вузлі оператора зв'язку та виконує функції агрегації трафіку, керування абонентськими пристроями та реалізації механізмів якості обслуговування. ODN є повністю пасивною ділянкою мережі й складається з волоконно-оптичних кабелів, муфт, кросів та оптичних розгалужувачів (сплітерів), які забезпечують фізичний розподіл сигналу між абонентами. ONU/ONT встановлюються безпосередньо у користувачів і здійснюють перетворення оптичного сигналу в електричний з подальшим наданням сервісів передачі даних, голосу та відео [5, 2].

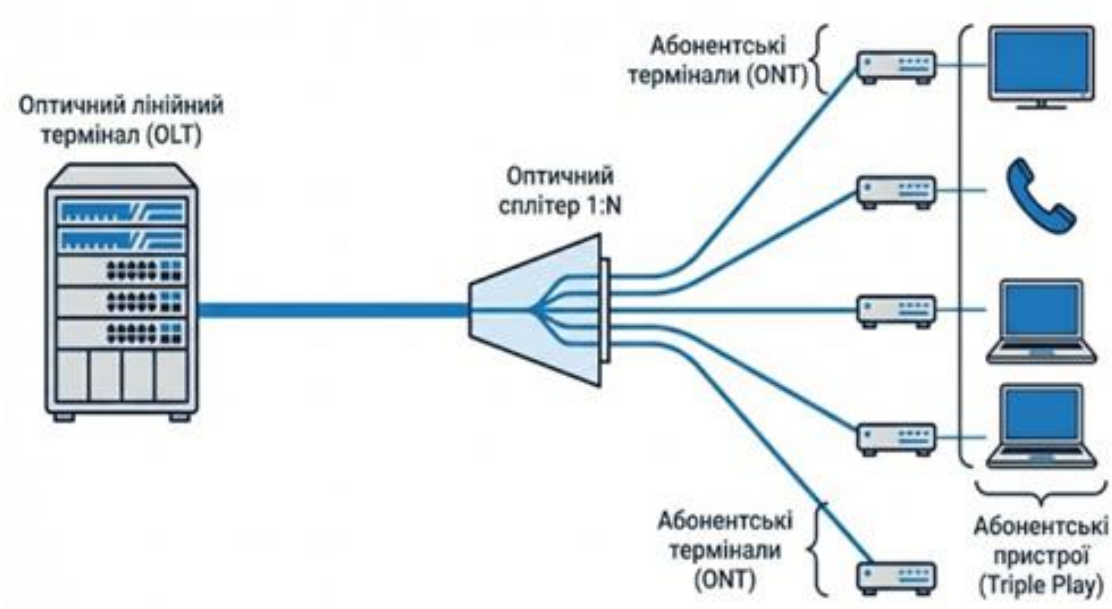


Рис. 1.1 Типова архітектура пасивної оптичної мережі доступу (OLT–ODN–ONT, топологія «точка–багатоточка)

На рис. 1.1 показано топологію «точка–багатоточка», у якій один порт OLT через пасивний оптичний сплітер 1:N обслуговує групу абонентських терміналів ONU/ONT. Оптична розподільча мережа ODN є повністю пасивною та не потребує електроживлення в розподільній частині, що підвищує надійність і знижує експлуатаційні витрати.

Передавання інформації в мережах GPON здійснюється асиметрично з використанням різних довжин хвиль для низхідного та висхідного напрямків. У низхідному напрямку (від OLT до ONU/ONT) застосовується довжина хвилі 1490 нм, тоді як у висхідному напрямку (від ONU/ONT до OLT) використовується довжина хвилі 1310 нм. Додатково для передавання телевізійного сигналу може застосовуватися довжина хвилі 1550 нм. Розділення та об’єднання сигналів різних довжин хвиль здійснюється за допомогою WDM-мультиплексорів, що дозволяє передавати кілька потоків інформації по одному оптичному волокну [11, 2]. Схема розділення довжин хвиль у PON наведена на рис. 1.2.

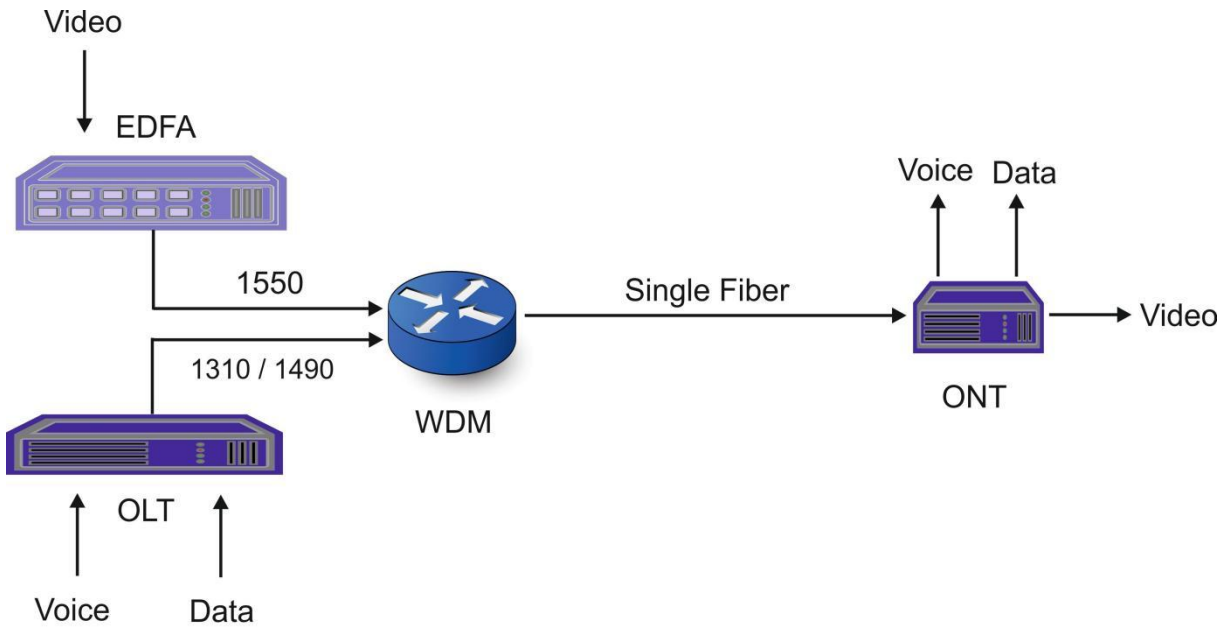


Рис. 1.2 Схема розділення довжин хвиль у PON (низхідний/висхідний напрямки + накладення відео)

Використання WDM забезпечує одночасну двонапрямну передачу по одному волокну за рахунок рознесення низхідного (1490 нм) та висхідного (1310 нм) потоків по різних довжинах хвиль. За потреби додатково застосовується довжина хвилі 1550 нм для передавання відеосигналу за принципом video overlay, що підтримує мультисервісну модель (дані/голос/відео) в межах однієї фізичної лінії.

Низхідний потік у GPON має широкомовний характер: OLT передає єдиний потік даних, який фізично надходить до всіх ONU/ONT у межах відповідного сегмента мережі. Оскільки середовище є спільним, для забезпечення конфіденційності застосовується шифрування AES-128, що унеможливлює перехоплення трафіку інших абонентів. Логічне розділення трафіку між абонентами виконується на рівні TC-кадрів і контейнерів GEM із використанням ідентифікаторів портів/потоків та механізмів пріоритезації, що забезпечує підтримку QoS для різнорідного трафіку. [13].

Передавання даних у висхідному напрямку в GPON здійснюється за принципом часової мультиплексії (TDMA). Оскільки всі ONU/ONT передають дані на одну й ту саму оптичну лінію, необхідно уникнути колізій сигналів. Для цього використовується механізм динамічного розподілу пропускної здатності (DBA), який централізовано керується OLT. OLT визначає часові інтервали, протягом яких кожен ONU/ONT має право передавати дані, з урахуванням поточного навантаження, класів трафіку та параметрів SLA. Структура кадру висхідного потоку GPON у режимі TDMA показана на рис. 1.3 [13].

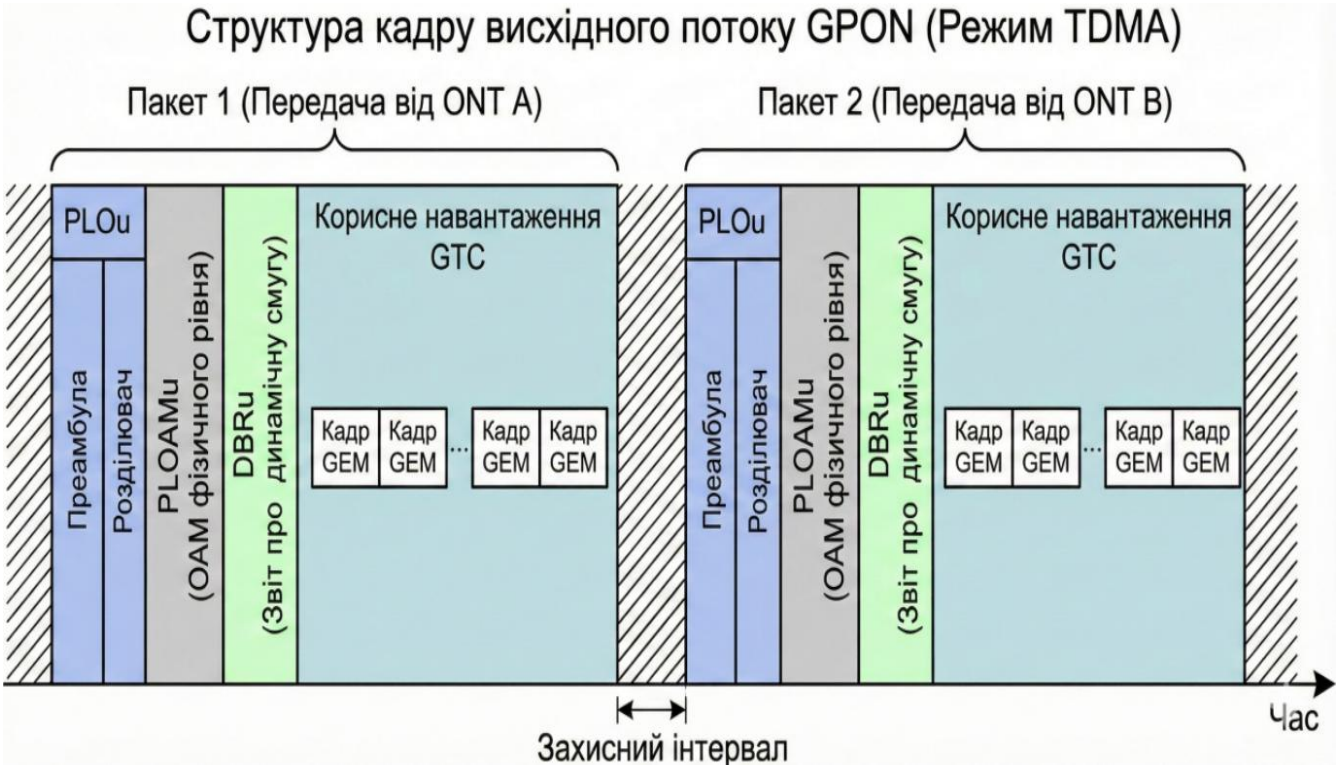


Рис. 1.3 Структура кадру GPON висхідного потоку (режим TDMA)

У висхідному напрямку ONU/ONT передають дані у виділених часових вікнах, а між передачами передбачаються захисні інтервали, що запобігає накладанню сигналів. DBA забезпечує ефективне використання ресурсу лінії, адаптуючи розподіл смуги пропускання до фактичного навантаження та вимог QoS.

Ключовим елементом архітектури GPON є механізм інкапсуляції даних GEM (GPON Encapsulation Method). Він забезпечує уніфіковане представлення трафіку незалежно від його типу та дозволяє ефективно реалізовувати мультисервісні послуги в межах однієї мережі. Завдяки використанню GEM-кадрів GPON підтримує передачу даних Ethernet, голосових сервісів та відео з гарантованими параметрами затримки та пропускної здатності [13].

Архітектура GPON характеризується високою масштабованістю та енергоефективністю. Відсутність активних елементів у розподільчій мережі зменшує кількість потенційних точок відмови та знижує витрати на обслуговування. Разом із цим збільшення коефіцієнта розгалуження або довжини

ліній потребує ретельного врахування оптичного бюджету, що безпосередньо впливає на проєктні рішення при побудові мереж доступу [11, 14, 15].

Таким чином, архітектура та принцип дії GPON забезпечують ефективну реалізацію широкосмугового доступу для значної кількості абонентів із мінімальними експлуатаційними витратами. Розуміння цих принципів є необхідною теоретичною основою для подальшого аналізу стандартів GPON і технологій наступного покоління, що розглядаються у наступному підрозділі.

1.4 Огляд сучасних стандартів ITU-T

Розвиток пасивних оптичних мереж доступу нерозривно пов’язаний зі стандартизацією, яка забезпечує технічну сумісність обладнання різних виробників, уніфікацію підходів до проєктування та стабільну якість надання послуг. Провідну роль у стандартизації PON-технологій відіграє Міжнародний союз електрозв’язку (International Telecommunication Union, ITU), зокрема його сектор стандартизації телекомунікацій - ITU-T. Саме в межах рекомендацій ITU-T було сформовано базові принципи функціонування GPON та технологій наступних поколінь, які сьогодні становлять основу сучасних FTTH-мереж у світі [5, 13].

Базовим стандартом, що визначає технологію GPON, є серія рекомендацій ITU-T G.984.x. Рекомендація ITU-T G.984.1, ухвалена у 2008 році, встановлює загальні характеристики GPON, включаючи архітектуру мережі, асиметричні швидкості передавання даних, принципи організації доступу та вимоги до оптичного бюджету. У цьому документі визначено концепцію пасивної розподільчої мережі, а також основні ролі елементів OLT, ODN і ONU/ONT, що забезпечує уніфікований підхід до побудови мереж доступу [5].

Фізичний рівень GPON детально регламентується рекомендацією ITU-T G.984.2, оновленою у 2019 році. Вона визначає допустимі довжини хвиль для низхідного та висхідного напрямків, параметри потужності передавання, чутливість приймачів, а також допустимі втрати в оптичній розподільчій мережі.

Дотримання цих вимог є критично важливим при розрахунку оптичного бюджету та виборі елементів ODN у процесі проєктування мережі [11].

Принципи формування кадрів і організації транспортного рівня GPON описані в рекомендації ITU-T G.984.3, прийнятій у 2014 році. Цей стандарт регламентує структуру низхідного та висхідного потоків, механізм інкапсуляції даних GEM, а також процедури синхронізації та керування доступом у висхідному напрямку. Саме положення G.984.3 визначають можливість реалізації мультисервісного передавання трафіку з гарантованими параметрами якості обслуговування [13].

Важливим елементом стандартизації GPON є рекомендація ITU-T G.984.4, яка описує інтерфейс керування та моніторингу абонентських терміналів ONU/ONT за допомогою протоколу OMCI (ONT Management and Control Interface). Цей стандарт забезпечує централізоване конфігурування, моніторинг та керування абонентськими пристроями з боку OLT, що суттєво спрощує експлуатацію мережі та знижує операційні витрати оператора [16].

Зростання потреб у пропускній здатності та симетричних каналах передавання даних призвело до розробки стандартів наступного покоління. Рекомендації ITU-T G.987.x, прийняті у 2010-2012 роках, визначають технологію XG-PON, яка забезпечує швидкість до 10 Гбіт/с у низхідному напрямку та 2,5 Гбіт/с у висхідному. Подальшим розвитком стала рекомендація ITU-T G.9807.1, ухвалена у 2016 році, що регламентує технологію XGS-PON із симетричною швидкістю 10/10 Гбіт/с. Ці стандарти зберігають сумісність із GPON на рівні оптичної розподільчої мережі, що дозволяє здійснювати поетапну модернізацію FTTH-інфраструктури без заміни пасивних елементів [9, 10, 11].

Паралельно зі стандартами доступу ITU-T розробляє рекомендації, що стосуються фізичної інфраструктури та експлуатаційних аспектів оптичних мереж. Зокрема, рекомендація ITU-T L.110 (2020 р.) визначає вимоги до оптичних кабелів для безпосереднього прокладання в ґрунті, що є актуальним для мереж доступу в приватному секторі та котеджних містечках [17]. Крім того, міжнародні стандарти IEC та європейські норми EN, адаптовані в Україні як ДСТУ,

регламентують вимоги до монтажу та випробування оптичних кабельних систем [18, 19, 20].

У національному контексті впровадження PON-технологій здійснюється з урахуванням вимог законодавства України, зокрема Закону України «Про електронні комунікації», який визначає правові та технічні засади побудови телекомунікаційних мереж, вимоги до безпеки та сумісності обладнання [21]. Поєднання міжнародних рекомендацій ITU-T і національних нормативних документів забезпечує єдиний підхід до проєктування та експлуатації оптичних мереж доступу.

Таким чином, сучасна система стандартів ITU-T формує цілісну нормативну базу для побудови, модернізації та експлуатації пасивних оптичних мереж. Саме дотримання цих рекомендацій дозволяє забезпечити технічну надійність, масштабованість і довгострокову ефективність GPON-мереж, що є принципово важливим для реалізації проєкту мережі доступу в котеджному містечку.

Проведений аналіз еволюції технологій доступу та архітектури GPON, а також огляд нормативної бази ITU-T, дозволили всебічно обґрунтувати вибір цієї технології як оптимального рішення для котеджного містечка з огляду на її надійність та економічну ефективність. Отримані результати формують необхідне теоретичне підґрунтя для переходу до наступного етапу роботи — автоматизованого проєктування пасивної оптичної мережі, що буде детально розглянуто у другому розділі.

2 АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРОЄКТУВАННЯ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

2.1 Автоматизація процесу проєктування

Проєктування сучасних пасивних оптичних мереж доступу (PON) є складним багатоетапним процесом, що потребує опрацювання значних обсягів різнорідних даних: від геопросторової основи території до атрибутів абонентських підключень і елементів лінійної інфраструктури. На відміну від традиційних мереж на мідній парі або топологій Ethernet «точка-точка», архітектура PON має деревоподібну структуру з каскадним підключенням пасивних сплітерів, що ускладнює планування трас, узгодження конфігурацій вузлів та ведення проєктної документації в єдиному середовищі [22].

У випадку котеджної забудови складність підвищується через нерегулярне розташування абонентів, значну протяжність кабельних маршрутів і наявність природних та штучних перешкод. За таких умов «ручний» підхід (паперові плани, базові графічні редактори, паралельні розрахунки в електронних таблицях) стає трудомістким і схильним до помилок: зростає вплив людського фактора, ускладнюється контроль актуальності даних, а внесення змін у проєктні матеріали потребує суттєвих витрат часу [22, 23].

Тому перехід до автоматизованого проєктування із застосуванням спеціалізованих програмних засобів (CAD/САПР) є практично необхідним. Використання профільних інструментів дозволяє інтегрувати геопросторові дані та об’єкти інфраструктури в межах єдиного проєкту, автоматизувати формування проєктної документації, а також забезпечити експорт результатів у формати, придатні для подальшого опрацювання в CAD-середовищі та підготовки специфікацій. Додатковою перевагою є вбудований контроль коректності конфігурації та виявлення критичних помилок ще на етапі моделювання, що знижує ризики помилкових проєктних рішень і спрощує подальше супроводження документації [22].

Ефективність автоматизації підтверджується практиками застосування спеціалізованого програмного забезпечення для планування та проєктування FTTH/PON: за даними галузевих матеріалів FTTH Council Europe (product sheet Comsof Fiber), використання таких інструментів може скорочувати тривалість планування/проєктування до 90% і забезпечувати зниження сумарних витрат розгортання мережі до 10% за рахунок оптимізації трасування, структури мережі та підбору компонентів [23]. Отже, застосування автоматизованих систем проєктування формує технологічну основу для якісного та керованого планування PON-мереж у складних умовах котеджної забудови і є доцільним підходом для подальших етапів проєктування.

Основні етапи процесу проєктування мережі FTTH (Fiber to the Home) для котеджного містечка можна формалізувати як послідовність таких кроків:

1. Збір і аналіз вихідних даних. Отримання картографічної основи (топоплан місцевості масштабу 1:500 або 1:2000), інформації про наявну інфраструктуру (опори ЛЕП, колодязі кабельної каналізації) та відомостей про потенційних абонентів. На цьому етапі важливо актуалізувати всі вхідні дані, оскільки від їх якості залежить точність подальших розрахунків і рішень проєктувальника [18].

2. Кластеризація абонентів (zoning). Територія поділяється на зони обслуговування (кластери), кожна з яких підключається до окремого розподільчого вузла (або окремого порту PON на станційному обладнанні). Для котеджного містечка це означає групування близько розташованих домоволодінь в один кластер з метою оптимізації довжини розподільчих кабелів. В результаті цього етапу визначається необхідна кількість кластерів та приблизне розташування точок розподілу сигналу.

3. Вибір топології та розміщення вузлів. Визначаються місця встановлення ключових елементів мережі - оптичного лінійного терміналу (OLT), розподільчих шаф або боксів (FDT/FAT - Fiber Distribution/Access Terminal) та точок підключення абонентів (розетки/коробки на будинках). Обирається схема спліттування оптичного сигналу: централізована (всі сплітери в одному вузлі) чи каскадна (два рівні сплітерів, розподілені по мережі). Для вибору оптимальної

схеми враховується щільність абонентів у кластерах та відстані від центрального вузла [18, 23].

4. Трасування ліній (маршрутизація). Прокладання оптимальних маршрутів магістральних кабелів і абонентських відгалужень на плані місцевості з урахуванням фізичних перепон (дороги, водойми, приватні ділянки) та норм будівництва (дозволені відстані до будівель, висота підвісу, глибина залягання кабелю тощо) [17, 18] . На цьому етапі формується попередня схема мережі - які будинки до якого розподільчого вузла підключаються, яким шляхом пролягатимуть кабелі.

5. Інженерні розрахунки. Ключовий етап, що охоплює такі задачі:

- Розрахунок оптичного бюджету втрат (потужності сигналу) для кожного кластера, зокрема для найвіддаленішого абонента мережі (Optical Power Budget). Цей розрахунок включає сумування всіх джерел загасання: довжини оптичного тракту, втрати на зварюванні волокон, конекторах, сплітерах тощо.
- Перевірка часових і дисперсійних обмежень. Для мереж GPON це перевірка максимальних відстаней та часових затримок згідно зі стандартом (макс. 20 км фізичної довжини, синхронізація кадрів 125 мкс і т.д.) [5, 11, 13].
- Розрахунок ємності кабельної інфраструктури: необхідної кількості волокон у магістральних та розподільчих кабелях, з врахуванням резерву на перспективу.
- Формування специфікації матеріалів (BOM - Bill of Materials). Підрахунок необхідної кількості кабелю різних типів, муфт, сплітерів, кріплень, патчкордів та активного обладнання (OLT, ONT). На цьому кроці проєктувальник готує зведену відомість матеріалів для закупівлі.
- Розробка робочої документації. Створення комплекту креслень і схем: план розташування трас на карті, структурна схема мережі, таблиці з’єднань волокон (сплайс-план), пояснювальна записка з розрахунками. Після цього проєкт може передаватися на реалізацію.

Приклад планування мережі в приватному секторі (котеджному містечку) із розміщенням розподільчих вузлів (оптичних сплітерів) на карті місцевості. Будинки згруповано в географічні кластери, кожен з яких обслуговується

окремим вузлом - таким чином сплітери розташовано центрально відносно груп абонентів

На схемі видно, що оптимальне розміщення розподільчих пристроїв мінімізує довжину розподільчих ліній та втрати сигналу. Подібне попереднє планування на карті дозволяє інженеру визначити кількість потрібних сплітерів і їхню прив’язку до місцевості перед детальним проєктуванням мережі.

На рисунку 2.1 показано приклад такого планування із розміщенням розподільчих елементів мережі.

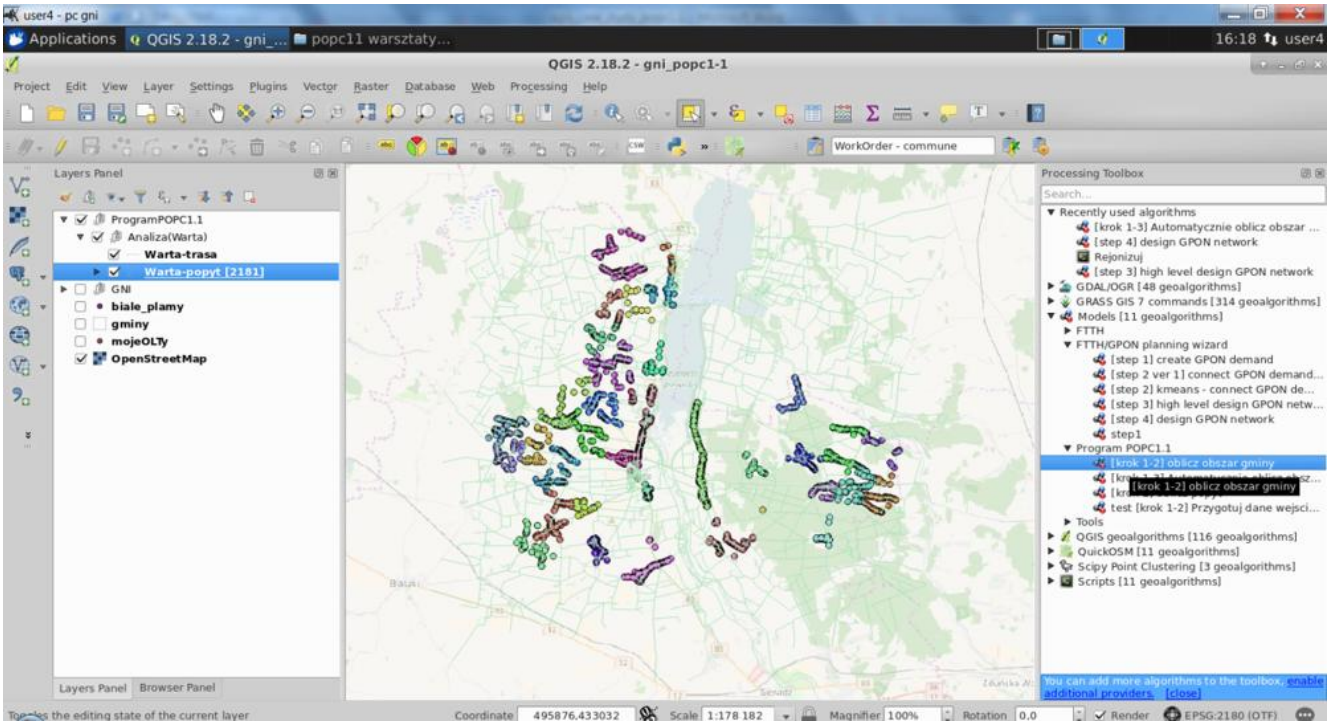


Рис. 2.1 Приклад планування мережі: розміщення розподільчих вузлів (сплітерів) на карті котеджного містечка

Як показує аналіз практичного досвіду побудови FTTH/GPON-мереж, за відсутності засобів автоматизації виникає низка типових проблем:

- Помилки в оптичному бюджеті. Для каскадних схем спліттування (наприклад, 1:4 + 1:16) з великою кількістю сегментів кабелю інженеру доводиться вручну сумувати втрати на кожній ділянці та з’єднанні. У мережі на 100+ абонентів кількість таких розрахунків стає критичною, що призводить до механічних

помилок. Як наслідок, з’являються «мертві зони», де рівень сигналу нижче чутливості приймача (менше -28 дБм) [11].

- Неоптимальне використання волокон. Без автоматизованого контролю ємності кабелів проєктувальник часто закладає надмірний запас волокон «про всяк випадок», що збільшує капітальні витрати. З іншого боку, можливий і дефіцит волокон на магістральних ділянках, якщо додати нових абонентів у вже побудовану мережу (через відсутність резерву).
- Складність актуалізації проєкту. Будь-яка зміна топології (перенесення опори, додавання нової вулиці тощо) вимагає повного перерахунку мережі та ручного оновлення всіх специфікацій. Це може займати дні або тижні, що неприпустимо при масштабних розгортаннях.
- Розрізненість даних. У ручному режимі графічна частина (креслення в AutoCAD) не пов’язана напряму з розрахунковими таблицями (Excel). Зміна довжини лінії на кресленні не оновлює автоматично кошторис матеріалів, що породжує невідповідності між кресленнями і специфікацією.

Для вирішення зазначених проблем системи автоматизованого проєктування мають забезпечувати виконання трьох груп задач:

Топологічні (геометричні) задачі: автоматизований пошук найкоротших маршрутів між вузлами (алгоритми пошуку шляхів - наприклад, Дейкстри [24]) з урахуванням «вартості» різних типів траси; автоматичне розміщення розподільчих елементів (сплітерів) у центрах кластерів для мінімізації сумарної довжини абонентських відгалужень тощо [22, 23].

Розрахункові (фізичні) задачі: наскрізний розрахунок загасання сигналу від OLT до кожного ONT у режимі реального часу; перевірка дотримання оптичного бюджету, часових обмежень та нормативних параметрів передачі відповідно до стандарту ITU-T G.984.2, з урахуванням класів оптичного бюджету B+ та C+ [11]. Інформаційно-логістичні задачі: автоматична генерація специфікації обладнання (BOM) на основі сформованої схеми; формування схем зварювання волокон у муфтах та кросах; експорт отриманих даних у GIS-системи для подальшої експлуатації мережі (наприклад, в форматі shapefile для використання в QGIS).

Таким чином, автоматизація проєктування PON є не просто допоміжним інструментом, а необхідною умовою для якісного і швидкого розгортання сучасних оптичних мереж. САПР дозволяють уникнути описаних помилок, забезпечують інтеграцію всіх даних проєкту та значно прискорюють процес. Далі наведено порівняння програмних засобів, що застосовуються для автоматизації проєктування PON-мереж.

2.2 Порівняння інструментів автоматизованого проєктування PON-мереж

У межах підрозділу розглянуто AutoCAD, OptiSystem, вендорні FTTH-конфігуратори та спеціалізований комплекс «Rural Network Configurator»

Ефективність розгортання технології PON значною мірою залежить від якості проєктних рішень, закладених на етапі планування. Мережа доступу - це складна інженерна система з великою кількістю елементів (сотні абонентських терміналів, десятки кілометрів кабелю, багаторівневе каскадування сплітерів), тому виконувати проєкт вручну нераціонально та дуже ризиковано з точки зору помилок [22, 23]. На щастя, сучасний ринок ПЗ пропонує широкий спектр інструментів для автоматизації проєктування PON. Їх можна класифікувати за функціональним призначенням на чотири основні групи:

Універсальні графічні САПР - програмні комплекси загального призначення для креслення і роботи з картографічною основою (наприклад, AutoCAD).

Системи математичного моделювання - програмні засоби для детального аналізу фізичних параметрів сигналу і оптичного тракту (наприклад, OptiSystem від Optiwave).

Спеціалізовані конфігуратори від виробників - утиліти для підбору обладнання під конкретні вимоги (наприклад, FTTH Configurator від Huawei/ZTE/CommScope).

Інженерні калькулятори топології - вузькоспеціалізовані програми для оптимізації структури мережі в специфічних умовах (приклад - «Rural Network Configurator» для сільських районів).

Нижче наведено аналіз представників кожного класу з точки зору їх можливостей та обмежень щодо проєктування мережі GPON котеджного містечка.

Універсальні графічні системи (на прикладі AutoCAD). AutoCAD залишається базовим інструментом інженера-проєктувальника телекомунікацій. Формат його креслень (.dwg) де-факто є стандартом обміну проєктною документацією між організаціями. В контексті PON AutoCAD використовується, головним чином, для геометричного планування мережі та дотримання норм прокладання трас [18]. Його функціональні можливості включають:

- Робота з картографією: імпорт цифрових топопланів місцевості та масштабування їх до потрібного масштабу, що дозволяє точно вимірювати відстані на кресленні.
- Шарова структура: рознесення різних елементів мережі по шарах (окремі шари для магістралей, відгалужень, обладнання тощо) для зручності відображення і друку схем.
- Бібліотеки блоків: наявність типових умовних позначень (блоків) для обладнання - значків OLT, сплітерів, муфт - з атрибутами, що спрощує розміщення повторюваних фрагментів мережі.

Разом з тим, головним обмеженням AutoCAD є відсутність інженерного інтелекту. Для системи відрізок кабелю на кресленні - це лише графічна лінія без жодних параметрів (не враховується довжина, загасання тощо). Через це виникають такі недоліки:

- Ручні розрахунки: довжини усіх ліній потрібно вимірювати вручну (підсумовуючи сегменти поліліній) і переносити в сторонні таблиці для розрахунку втрат.
- Відсутність валідації: AutoCAD не контролює логічну зв’язаність мережі - наприклад, програма «дозволить» намалювати кабель, не підключений до жодного сплітера або порту, і не повідомить про помилку.

На рис. 2.2 показано приклад фрагмента топології PON, створеної на картографічній основі (відповідає графічному представленню мережі в геоінформаційних системах, подібний підхід використовується при експорті

даних з AutoCAD). Тут видно центральний вузол (OLT) та підключені до нього абонентські вузли через каскад сплітерів.

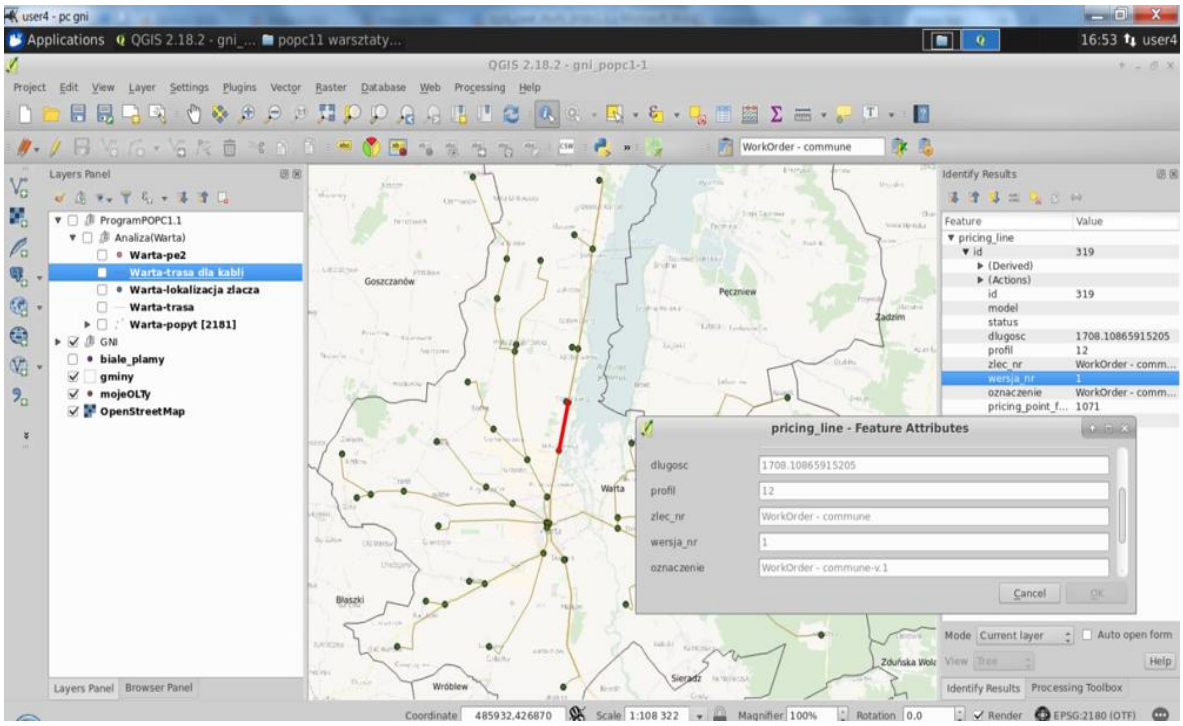


Рис. 2.2 Фрагмент топології мережі PON із відображенням траси кабелів та вузлів на карті місцевості

Системи математичного моделювання (на прикладі OptiSystem). OptiSystem (Optiwave Systems) - це програмний комплекс класу EDA (Electronic Design Automation), призначений для моделювання фізичних параметрів оптичних ліній зв’язку. Програмне середовище дозволяє створювати цифрову модель фрагмента оптичної мережі та виконувати імітаційний аналіз роботи оптичного тракту за заданих параметрів.

У процесі моделювання інженер задає основні характеристики джерела випромінювання, параметри оптичного волокна (наприклад, стандартного одномодового волокна SMF G.652 з нормованими значеннями загасання та дисперсії [25]), а також параметри приймального обладнання. Оптичні компоненти поєднуються у віртуальну схему, що дає змогу оцінити працездатність лінії за різних довжин трас та варіантів конфігурації.

Основною перевагою OptiSystem є можливість перевірки відповідності проєктних параметрів оптичного тракту граничним умовам стандарту, зокрема за довжиною лінії та оптичним бюджетом. Це дозволяє зробити висновок щодо працездатності мережі в умовах, наближених до граничних, без втручання у реальну інфраструктуру [11, 25].

Водночас для масового проєктування мереж доступу PON програмний комплекс OptiSystem є надлишковим інструментом. Він більше орієнтований на дослідницькі задачі та точковий аналіз фізичних параметрів, ніж на оперативне автоматизоване проєктування розгалужених мереж доступу. Основними обмеженнями використання OptiSystem у межах кваліфікаційної роботи є:

відсутність геоприв’язки, що унеможливлює використання картографічної основи та планування реального розміщення елементів мережі;

надлишкова складність моделювання, оскільки більшість параметрів фізичного рівня не мають визначального впливу на роботу мереж GPON стандартної архітектури з довжинами ліній до 5-10 км.

Таким чином, у даній роботі OptiSystem розглядається не як основний інструмент автоматизованого проєктування PON-мереж, а як допоміжний засіб для перевірки фізичної реалізовності прийнятих інженерних рішень. Основні задачі автоматизації проєктування доцільно вирішувати за допомогою спеціалізованих програмних засобів, орієнтованих на топологію мережі, розрахунок оптичного бюджету та формування проєктної документації.

Для перевірки працездатності спроєктованої мережі часто застосовують моделювання в середовищі OptiSystem. Це дозволяє змоделювати оптичну лінію, оцінити її характеристики, спектри сигналу та завадостійкість.

Рисунок 2.3 демонструє інтерфейс програмного середовища OptiSystem

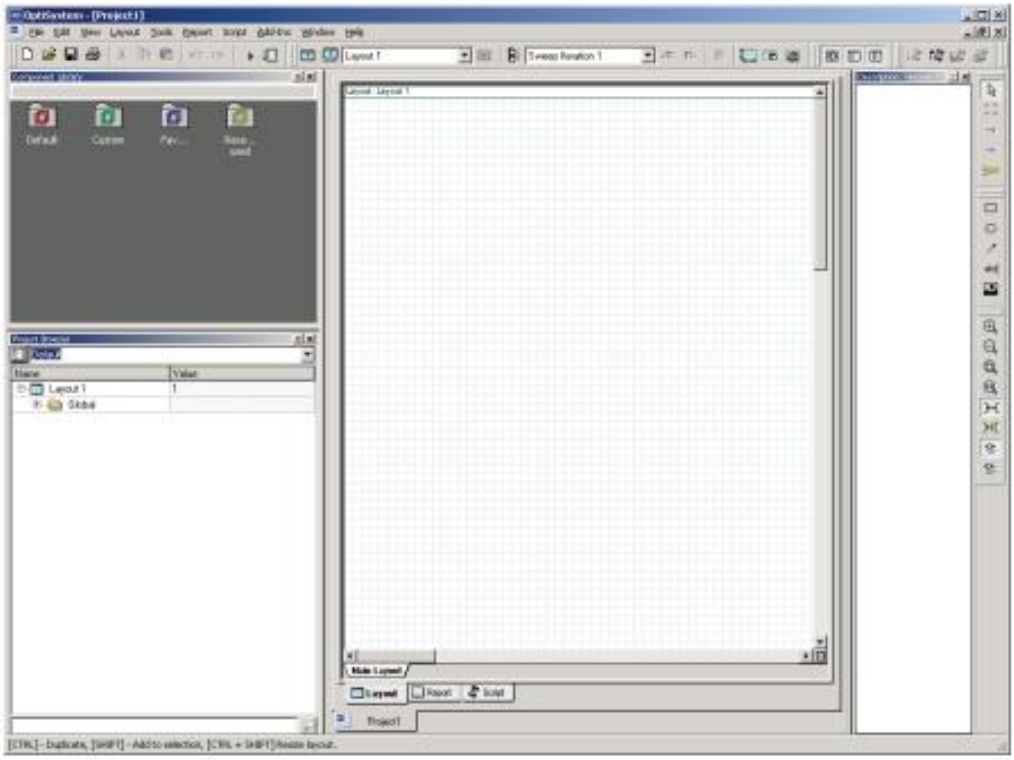


Рис. 2.3 Інтерфейс програмного комплексу OptiSystem

Спеціалізовані конфігуратори вендорів (на прикладі FTTH Configurator). Багато виробників телекомунікаційного обладнання пропонують власні програмні утиліти для допомоги у проєктуванні мереж. Зазвичай такі конфігуратори працюють за принципом підбору обладнання під задані вимоги. Наприклад, FTTH Configurator від компанії Huawei дозволяє, задавши необхідну ємність мережі і тип послуг, автоматично підібрати склад OLT (шасі, плати, трансивери) [26], необхідну кількість ONT, сплітери та інші компоненти. Програма контролює сумісність компонентів (чи вистачає слотів, потужності живлення, чи підтримуються потрібні версії ПЗ) і формує специфікацію з каталожними номерами. Головна перевага таких інструментів - виключення помилок при замовленні обладнання: отриманий BOM гарантовано коректний, всі компоненти сумісні.

Втім, недоліки теж суттєві. По-перше, конфігуратори орієнтовані на обладнання конкретного виробника, а це в свою чергу обмежує можливість комбінувати обладнання різних виробників. Це обмежує гнучкість проєкту та може призвести до завищення вартості (якщо частина рішення дешевша у іншого

виробника, використати це неможливо). По-друге, подібні утиліти мало придатні для зовнішньої кабельної інфраструктури. Вони не допоможуть оптимізувати топологію ліній, не виконають розрахунок загасання на трасі - тобто потребу в окремому геоплануванні не знімають.

Інженерні калькулятори топології (на прикладі «Rural Network Configurator»). Це відносно новий клас інструментів, спеціально розроблених для автоматизації проєктування GPON-мереж у сільській місцевостіта приватному секторі [22]. Програмний комплекс «Rural Network Configurator» створений з урахуванням особливостей приватної забудови: великі відстані, розкидані поселення, необхідність каскадного спліттування. Алгоритм його роботи включає імпорт геоданих (координат опор, будинків), автоматичне генерування графу мережі по цих точках, оптимальне розміщення сплітерів по кластерах і прокладання кабелів з урахуванням провисання повітряних ліній. Програма самостійно розраховує оптичний бюджет для найгіршого випадку (worst-case), тобто для найдовшого абонентського відгалуження, і перевіряє, щоб рівень сигналу перевищував мінімально допустимий.

Переваги «Rural Network Configurator» такі:

1. Повна спеціалізація на PON: на відміну від універсального AutoCAD, тут закладена логіка саме пасивних оптичних мереж. Програма «знає» стандарт G.984, враховує поділ потужності на сплітерах, чутливість приймачів тощо.
2. Висока швидкість: типовий проєкт на 50-100 абонентів генерується за 20-30 хвилин, тоді як вручну це зайняло б кілька днів.
3. Універсальна специфікація: результатом є список пасивних компонентів (муфти, кабелі, кріплення) та характеристик (довжини кабелів, кількість зварювань). Він не прив’язаний до бренду - можна обирати обладнання різних виробників під вже готові параметри мережі.

На етапі підбору обладнання доцільно використовувати спеціалізовані конфігуратори, які автоматично формують специфікації, перевіряють сумісність компонентів і полегшують підбір OLT, ONT, карт і модулів. Залежно від підходу - використовують або вендорні конфігуратори, або універсальні інструменти.

Рисунки 2.4 та 2.5 ілюструють інтерфейси типового вендорного конфігуратора FTTH та програми «Rural Network Configurator» відповідно.

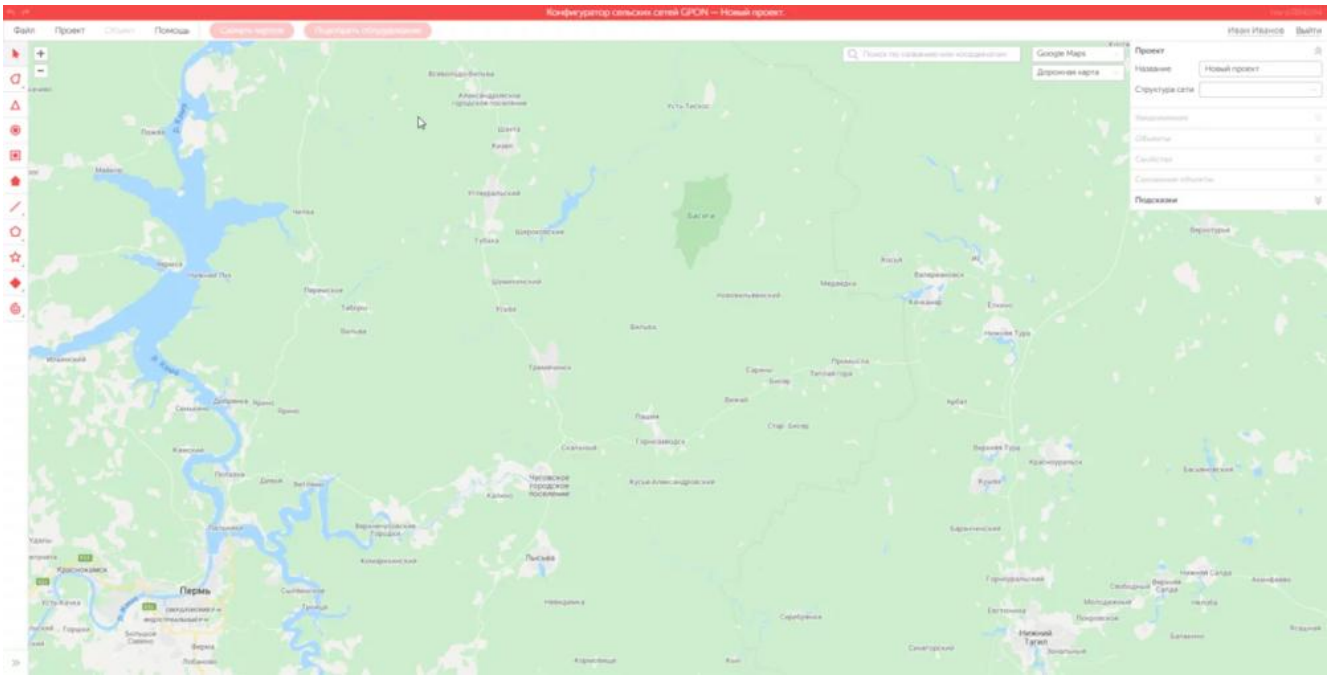


Рис. 2.4 Інтерфейс типового вендорного конфігуратора FTTH

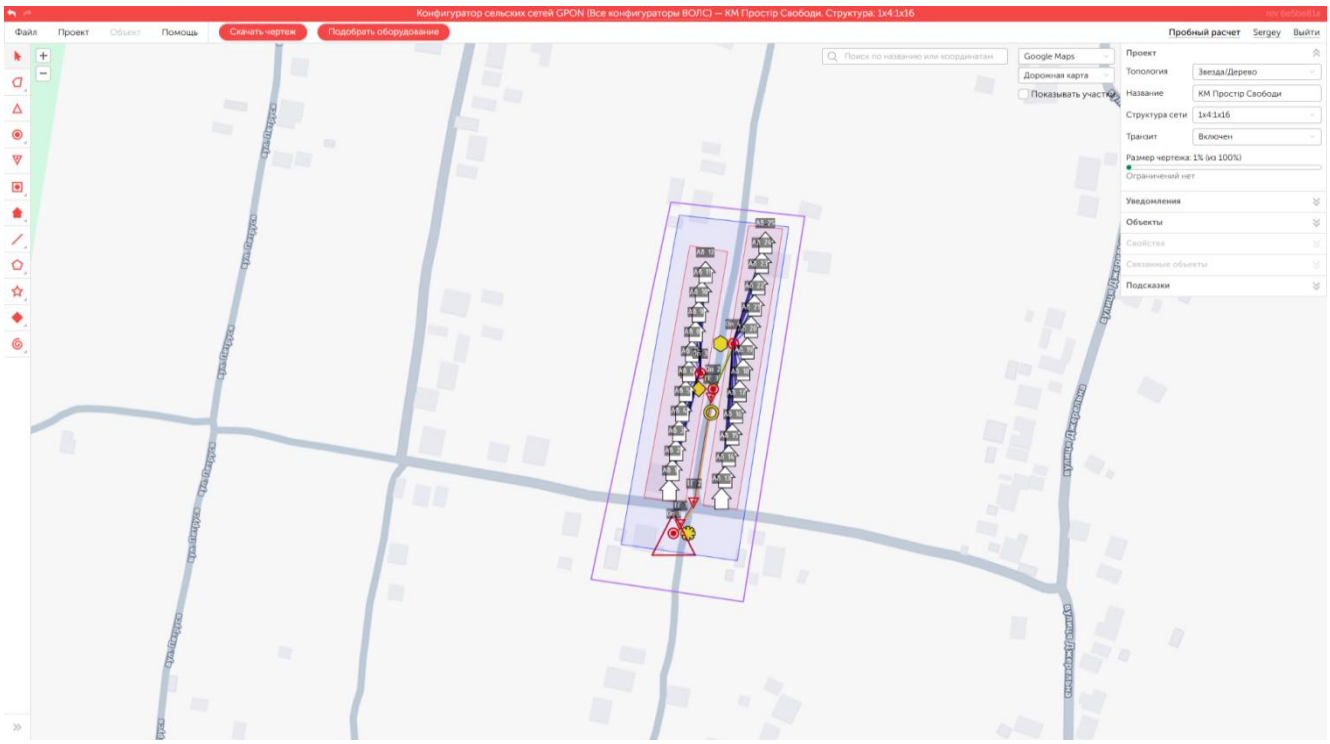


Рис. 2.5 Інтерфейс спеціалізованої програми «Rural Network Configurator»

Для наочного порівняння розглянутих програмних засобів зведемо їх характеристики у таблицю 2.1. Основними критеріями вибору є: можливість роботи з картою місцевості, автоматизація розрахунку оптичного бюджету, підтримка оптимального розміщення сплітерів, генерація специфікацій та загальна трудомісткість проєктування.

Таблиця 2.1

Порівняльний аналіз засобів автоматизованого проєктування PON [18, 22, 25, 26]

	Засобів автоматизованого проєктування			
Категорії	AutoCAD	OptiSystem	FTTH Configurator	Rural Network Configurator
Робота з картографічною основою	Повна підтримка (плани, GIS, карти)	Не підтримується	Обмежена	Повна підтримка
Розрахунок оптичного бюджету	Ручний	На основі фізичного моделювання	Шаблонний	Автоматизований
Підбір місць для сплітерів	Виконується вручну	Виконується вручну	Частково автоматизований	Автоматизований
Формування специфікації (BOM)	Ускладнене	Не підтримується	Обмежене обладнанням виробника	Повне, універсальне
Трудомісткість проєктування	Висока	Висока	Середня	Низька

Як видно з таблиці 2.1, універсальні програмні засоби AutoCAD та OptiSystem не забезпечують комплексної автоматизації проєктування PON-мереж. FTTH Configurator має обмеження, пов’язані з конкретним виробником обладнання. Найбільш повний функціонал для автоматизованого проєктування мереж доступу в умовах приватної забудови забезпечує Rural Network Configurator, що й зумовило його вибір для реалізації даного проєкту.

2.3 Вибір програмного засобу для проєкту

Спираючись на проведений аналіз засобів автоматизованого проєктування, доцільно використати оптимальний програмний інструмент для практичної реалізації дипломного проєкту. Критеріями вибору є достатня функціональність, зокрема наявність автоматизованих розрахунків, точність результатів, здатність

працювати з геопросторовими даними, а також мінімізація обсягу ручної праці проєктувальника [22, 23].

У таблиці 2.1 показано, що з чотирьох розглянутих програмних засобів програмний комплекс «Rural Network Configurator» забезпечує найбільш повний набір функціональних можливостей за всіма ключовими критеріями порівняння. Дане рішення реалізує повний цикл проєктування пасивної оптичної мережі доступу за принципом end-to-end в одному середовищі - від імпорту вихідних геоданих до формування підсумкової специфікації обладнання . Перевага підходу end-to-end досягається за рахунок автоматизованого імпорту геоданих і розміщення вузлів на картографічній основі, автоматичного трасування/оптимізації кабельних маршрутів, формування специфікації (BOM) та наскрізної перевірки оптичного бюджету (втрати в кабелі, сплітерах і з'єднаннях) відповідно до вимог GPON [22].

«Rural Network Configurator» забезпечує найбільш повний набір функцій саме за рахунок інтеграції ключових етапів проєктування в одному середовищі: імпорту картографічної основи (геоданих), трасування оптичних ліній та формування топології ODN із вибором сплітерів і кабельної інфраструктури. Додатковою перевагою є автоматизовані інженерні розрахунки (зокрема оптичного бюджету/втрат) і формування специфікації матеріалів та обладнання (BOM), що зменшує ймовірність помилок і прискорює підготовку проєктної документації [22].

Програма виконує наскрізний розрахунок оптичного бюджету відповідно до вимог стандарту GPON (ITU-T G.984), враховуючи довжини ліній, втрати в кабелі, сплітерах і з'єднаннях [5, 11, 13].

Важливою перевагою є наочна візуалізація схеми мережі безпосередньо на карті місцевості, що у більшості випадків усуває потребу в додатковому кресленні трас у середовищі AutoCAD [22, 23].

Отримані зображення інтерфейсу програми можуть бути використані для формування графічної частини проєктної документації. Крім того, програмний комплекс автоматично формує підсумкову специфікацію матеріалів (кабелі,

сплітери, муфти, кріплення) та активного обладнання, мінімізуючи ймовірність помилок при ручному підрахунку або перевірці сумісності компонентів.

Суттєвим аргументом на користь обраного інструмента є його алгоритмічна основа трасування мережі, що базується на методах теорії графів. Програма автоматично будує мінімальне кістякове дерево (Minimum Spanning Tree) для оптимізації сумарної довжини кабельних трас від OLT до абонентських вузлів [24].

На відміну від універсальних графічних систем, де прокладання ліній здійснюється вручну, «Rural Network Configurator» забезпечує математично обґрунтовану мінімізацію довжин кабелю, що безпосередньо впливає на зниження капітальних витрат (CAPEX). Алгоритм також враховує топологічні обмеження місцевості (дорожню інфраструктуру, забудову, перешкоди), що є критичним для умов реального котеджного містечка [22, 24].

Оскільки в дипломному проєкті прийнято рішення про підземне прокладання комунікацій у кабельній каналізації, важливим критерієм стала можливість коректного врахування технологічних запасів. Обраний програмний засіб дозволяє задавати коефіцієнти запасу на вигини та монтажні довжини в колодязях для кожної ділянки окремо, що виключає типові помилки ручного проєктування, пов’язані з недостатньою довжиною кабелю під час виконання монтажних робіт. Інструменти загального призначення для візуалізації картографічних даних не забезпечують такого рівня деталізації та не можуть розглядатися як повноцінні інженерні САПР [17, 18, 27].

Висновок: у другому розділі кваліфікаційної роботи виконано аналіз програмних засобів, що застосовуються для автоматизації процесу проєктування пасивних оптичних мереж доступу. Розглянуто основні класи програмного забезпечення, зокрема універсальні графічні системи автоматизованого проєктування, програмні комплекси математичного моделювання фізичного рівня оптичних ліній, а також спеціалізовані інструменти для проєктування мереж доступу.

Проведений аналіз показав, що універсальні графічні САПР, такі як AutoCAD, забезпечують побудову топологічних схем мережі, однак не забезпечують автоматизованого виконання інженерних розрахунків і перевірки проєктних рішень, що зумовлює значний обсяг ручної роботи. Системи фізичного моделювання, зокрема OptiSystem, дозволяють досліджувати граничні параметри оптичного тракту, проте їх використання у практичному проєктуванні мереж доступу є обмеженим через надлишкову складність, відсутність геоприв’язки та неможливість формування повноцінної проєктної документації.

На основі порівняльного аналізу програмних засобів, результати якого наведено в таблиці 2.1, обґрунтовано доцільність використання спеціалізованого програмного комплексу «Rural Network Configurator» для реалізації дипломного проєкту. Даний програмний засіб забезпечує інтегрований підхід до проєктування мережі, поєднуючи роботу з геопросторовими даними, автоматизоване формування топології кабельної інфраструктури, розрахунок оптичного бюджету відповідно до вимог стандарту GPON (ITU-T G.984) та формування специфікації матеріалів і обладнання.

Встановлено, що застосування алгоритмів трасування мережі, реалізованих на основі методів теорії графів, дозволяє мінімізувати сумарну довжину кабельних трас і знизити капітальні витрати на побудову мережі. Крім того, програмний комплекс забезпечує коректний облік технологічних запасів кабелю, що є важливим при підземному прокладанні ліній у кабельній каналізації.

Таким чином, результати другого розділу підтверджують обґрунтованість вибору програмного засобу для практичної реалізації проєкту мережі GPON котеджного містечка та створюють методичну основу для виконання інженерних розрахунків і розроблення проєктних рішень у наступному розділі роботи.

3. ПРОЄКТУВАННЯ ПАСИВНОЇ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ КОТЕДЖНОГО МІСТЕЧКА

Цей розділ присвячено розробці практичного проєкту пасивної оптичної мережі (PON) на базі технології GPON для умовного котеджного містечка. Проєктування включає визначення вихідних даних, вибір топології, розрахунок оптичного бюджету потужності [11], побудову схем та формування специфікації необхідного обладнання [22, 23].

3.1 Проєктування GPON-мережі для котеджного містечка

Проєктована мережа котеджного містечка «Простір Свободи» базується на технології GPON (Gigabit-capable Passive Optical Network), що відповідає рекомендаціям ITU-T G.984.x [5, 11, 13, 16]. Вибір GPON обумовлений здатністю цієї технології забезпечити мультисервісний доступ - послуги Triple Play (високошвидкісний доступ до Інтернету, IPTV та VoIP-телефонія) по єдиній волоконно-оптичній інфраструктурі [2, 12].

Запланований набір сервісів включає передачу даних, IP-телебачення та голос, причому для відеосигналу використовується технологія IPTV по тому ж каналу, що й інші послуги (довжина хвилі 1490 нм) [11]. Аналогове телевізійне мовлення в оптичному діапазоні не застосовується, що спрощує архітектуру мережі та усуває потребу в окремому оптичному каналі на 1550 нм під аналоговий RF-сигнал [11]. Водночас у теоретичній частині (рис. 1.2) розглянуто можливість накладення відеоканалу на 1550 нм як опціональний сценарій; у даному проєкті обрано IPTV без виділення окремого оптичного RF-каналу. Проєктування мережі здійснюється з урахуванням вимог чинного законодавства України у сфері телекомунікацій, зокрема Закону України «Про електронні комунікації» [21], який регламентує дотримання технічних норм під час побудови електронних комунікаційних мереж та надання послуг абонентам.

Згідно зі стандартом GPON ITU-T G.984, одна оптична лінія здатна обслуговувати до 64 абонентських вузлів ONT за рахунок розподілу потужності

оптичного сигналу [5, 11]. Стандарт передбачає симетричну пасивну топологію точка-багатоточка, в якій один порт OLT може забезпечити сумарну пропускну здатність до ~2,5 Гбіт/с у низхідному каналі (1490 нм) та ~1,25 Гбіт/с у висхідному (1310 нм) [11]. Цей загальний гігабітний ресурс динамічно розподіляється між абонентами GPON за допомогою механізмів TDM/TDMA та DBA, що дозволяє надавати кожному користувачу гарантовані швидкості відповідно до тарифних планів [5, 13]. GPON розрахований на радіус дії до 20 км без активних підсилювачів сигналу, що значно перевищує максимальну довжину мережі в межах містечка (≈2,8 км) [11]. Таким чином, обрана технологія повністю відповідає вимогам покриття території та кількості абонентів, забезпечуючи необхідний запас пропускної здатності та дальності без виходу за межі нормативів.

Топологія мережі спроєктована за ієрархічною схемою з двоступеневим розгалуженням оптичного сигналу: OLT → 1×4 → 1×16 → ONT. На магістральній ділянці від OLT встановлено пасивний сплітер 1×4, який розподіляє оптичний сигнал на чотири напрямки (розподільчі ділянки). Далі в кожному напрямку використано другий етап розгалуження - сплітери 1×16, розташовані ближче до груп абонентів. Загальний номінальний коефіцієнт розподілу таким чином може сягати 1:64, що узгоджується з максимальними можливостями GPON [5, 11]. У поточному проєкті передбачено підключення 25 абонентських терміналів (ONT) - менше за граничні 64 - отже, частина виходів сплітерів резервується під перспективне розширення мережі [22, 26]. Каскадне розгалуження 1×4 → 1×16 обране з метою оптимізації структури мережі та мінімізації витрат волокна: перший сплітер на 4 порти дозволяє суттєво скоротити кількість магістральних волокон, розподіляючи трафік по секторах містечка, а другий етап (1×16) забезпечує необхідну щільність підключень у кожному секторі [22]. Така архітектура спрощує прокладання кабелів по території: від вузла OLT до розподільчих боксів іде обмежена кількість магістральних ліній, після чого сигнал розгалужується локально, поблизу абонентів. В результаті забезпечується

покриття всієї площі котеджного містечка при довжині ліній до 2,8 км, без перевищення допустимих втрат сигналу.

Оптична розподільна мережа (ODN) реалізована на базі сучасних одномодових оптичних кабелів з волокном типу G.652 [25]. Від станційного обладнання OLT до першого сплітера прокладається магістральний кабель ОК-SM-12F (12 волокон), далі від нього до кожного з віддалених 1×16 сплітерів - розподільчі кабелі ОК-SM-4F (4 волокна), і насамкінець до будинків абонентів йдуть відводи FTTH Drop 1F (1 волокно на підключення) [26]. Використання 12-волоконного кабелю на фідерній ділянці забезпечує наявність резервних волокон для потенційного збільшення ємності мережі або введення додаткових PON-портів у майбутньому. Усі оптичні волокна виконані за стандартом ITU-T G.652.D, що характеризується низькими втратами в основних вікнах прозорості (не більше ~0, 35 дБ/км на 1310 нм та ~0, 22 дБ/км на 1550 нм) [25]. Дана категорія волокна є ненаправленим зсувом дисперсії (NDSF) і має усунений водяний пік, тому ефективно працює в розширеному спектральному діапазоні 1260-1625 нм [25]. Це робить G.652.D універсальним вибором для мереж доступу, оскільки дане волокно повністю охоплює діапазони GPON (O- та C-діапазони) і сумісне з технологією CWDM для потенційного мультиплексування інших сервісів [28]. Враховуючи відносно більший мінімальний радіус вигину волокон G.652.D (~30 мм) порівняно з новими гнучкими волокнами, при монтажі кабелів особлива увага приділяється дотриманню норм вигину та прокладання траси без різких поворотів [18, 19, 26]. Монтаж оптичної кабельної інфраструктури здійснюється відповідно до міжнародних і національних стандартів (наприклад, серії IEC 60794 та відповідних ДСТУ), які встановлюють вимоги до конструкції та прокладання волоконно-оптичних кабелів [19]. Згідно з цими нормами, обрані кабелі відповідають критеріям механічної міцності, захисту від впливу довкілля та мінімальної загасаючої здатності. Траса мережі спроєктована таким чином, щоб забезпечити захист кабелів (використання підземних каналів або підвісу на опорах при необхідності) і зручність обслуговування, а всі з’єднання виконуються

конекторизацією або зварюванням згідно з ДСТУ/IEC з метою мінімізувати відбивання та додаткові втрати на стиках [18, 20].

Вибір оптичного обладнання класу B+ пояснюється достатністю його бюджетних характеристик для заданої топології та відстаней. Клас B+ в термінах GPON означає підтримку збільшеного оптичного бюджету на рівні ~28 дБ, що досягається використанням високочутливих фотодіодів (APD) в ONT та підвищеної потужності випромінювання лазера OLT [11].

Стандартні оптичні модулі GPON класу B+ забезпечують номінальну дальність до 20 км та розраховані на максимальне сумарне розгалуження 1:64 без регенерації сигналу [11, 5].

Розрахунок бюджету потужності для даного проєкту показує, що повні втрати в тракті не перевищують цей ліміт. Пасивні сплітери 1×4 і 1×16 вносять основну частку загасання: приблизно 7 дБ та 14-15 дБ відповідно (сумарно ~21-22 дБ) на кожну гілку. Додаткові втрати на довжині оптичного волокна (2,8 км × 0,35 дБ/км ≈ 1 дБ) та з'єднаннях (конектори, зварки - орієнтовно 1-2 дБ сумарно) доводять загальний бюджет тракту до ~24 дБ, що знаходиться в межах допустимого для класу B+ [19, 26]. Таким чином, обране обладнання має достатній запас по потужності для гарантованої роботи всієї мережі, навіть з урахуванням старіння компонентів та можливих коливань затухання при різних температурах. Застосування дорожчих прийомопередавачів класу C+ (бюджет ~30 дБ) не є необхідним з огляду на короткі відстані і невеликі втрати в мережі, тому клас B+ виступає оптимальним з позиції економічності та відповідності поставленим задачам.

Запроєктована мережа належить до типового варіанту топології PON без резервування (однонапрямна схема живлення абонентів від одного OLT, так званий захист типу A) [5]. Обраний варіант захисту типу A є типовим для мереж доступу приватного житлового сектору та відповідає практиці операторів зв'язку при розгортанні GPON у сегменті FTTH.

Відмова від дублювання ліній або портів обумовлена прагненням до спрощення і здешевлення системи: для мережі масштабу котеджного містечка

впровадження резервування не є критично необхідним з точки зору надійності. Пасивна оптична мережа GPON сама по собі має високий рівень стабільності за рахунок мінімуму активних вузлів, а потенційні точки відмови (волоконна лінія чи порт OLT) статистично рідко виходять з ладу за належного монтажу і експлуатації. У випадку пошкодження магістрального оптоволокна або відмови обладнання сервіс для всіх 25 абонентів може бути тимчасово перерваний, проте такі ситуації розглядаються як аварійні і вирішуються оперативними ремонтно-відновлювальними роботами в регламентовані терміни. Практика показує, що для відносно невеликої мережі доступу цілком припустимо покладатися на швидке відновлення, а не на складні схеми резервування, особливо враховуючи бюджетні обмеження проєкту [22]. Відповідно до рекомендацій ITU-T G.984.1 [5], передбачені у стандарті варіанти дублювання PON (Type B - резервування порту OLT і магістралі, Type C - повне дублювання OLT-ONT) застосовуються переважно у критично важливих сегментах мереж (наприклад, для корпоративних клієнтів чи базових станцій стільникового зв'язку). Для заданого житлового об'єкта відсутність резервування є прийнятним компромісом, що дозволяє мінімізувати вартість і складність мережі, не порушуючи вимог до якості надання послуг абонентам.

Проєктування GPON-мережі здійснено із використанням програмно-апаратного інструменту класу Rural Network Configurator - незалежної від виробника платформи для конфігурації сільських оптичних мереж. За допомогою цього засобу були промодельовані всі ділянки мережі, виконано автоматизований розрахунок бюджету оптичної лінії та перевірено дотримання показників затухання і рівнів сигналу у відповідності до класу B+ [11, 22]. Інструментарій дозволив оптимізувати розташування сплітерів та маршрут кабелів, врахувати характеристики обладнання і кабельної інфраструктури. В результаті сформовано технічно обґрунтований проєкт GPON-мережі, який відповідає сучасним галузевим стандартам [5, 11, 13, 16] та забезпечує мешканців котеджного містечка повноцінним комплексом телекомунікаційних послуг Triple Play на високому рівні якості.

3.2 Топологія мережі GPON

На етапі конфігурації проєкту в середовищі спеціалізованого САПР (системи автоматизованого проєктування) «Rural Network Configurator» було визначено фізичні характеристики компонентів мережі, які відповідають обраному підземному способу прокладання ліній у захисних полімерних трубах (кабельній каналізації). Такий метод будівництва забезпечує високу надійність лінії, захист від впливу погодних умов, вандалізму та гарантує естетичний вигляд інфраструктури котеджного містечка. Для забезпечення точності подальших автоматизованих розрахунків оптичного бюджету в програму було внесено параметри, що відповідають реальним умовам експлуатації та вимогам нормативних документів [18, 27].

Для моделювання середовища передачі задано базові параметри загасання, характерні для стандартного одномодового волокна G.652.D . З метою розрахунку найгіршого сценарію (worst-case design) встановлено коефіцієнти кілометричного загасання: 0,35 дБ/км для довжини хвилі 1310 нм (висхідний потік) та 0,25 дБ/км для 1490 нм (низхідний потік) [25, 26] . Враховуючи специфіку монтажу в колодязях кабельної каналізації та ґрунті, задано консервативні значення втрат на з'єднаннях: для нероз’ємних з’єднань (зварювання волокон) прийнято величину 0,1 дБ, а для роз’ємних комутаційних з’єднань (конекторів SC/APC) - 0,20 дБ [14, 20, 26].

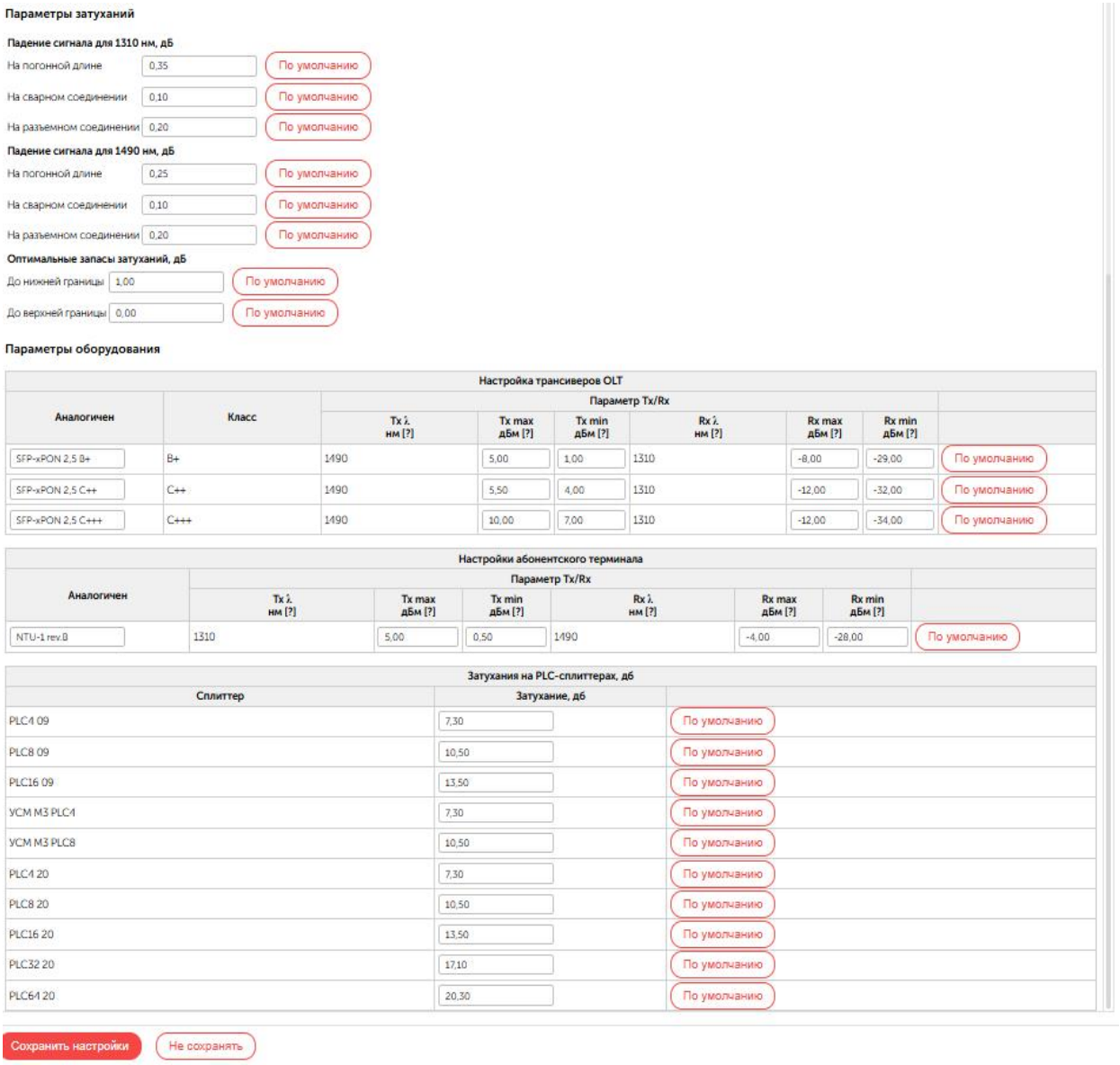
Також налаштовано параметри активного обладнання класу B+ (бюджет 28 дБ) та пасивних сплітерів PLC згідно з їхніми паспортними даними [29]. Основні параметри, внесені в систему проєктування, зведено в таблицю 3.1 [11, 25, 26, 29].

Таблиця 3.1

Параметри компонентів для розрахунку оптичного бюджету

Параметр	Значення для 1310 нм	Значення для 1490 нм
Загасання у волокні G.652.D (дБ/км)	0,35	0,25
Втрати на зварному з'єднанні (дБ/шт.)	0,1	0,1
Втрати на конекторі SC/APC (дБ/шт.)	0,2	0,2
Вставні втрати сплітера 1×4 (дБ)	7,3	7,3
Вставні втрати сплітера 1×16 (дБ)	13,5	13,5
Клас обладнання OLT/ONT	Class B+	(Бюджет 28 дБ)

Вікно конфігурації параметрів загасання та обладнання в програмному комплексі наведено на рисунку 3.1.



Параметры затуханий

Падение сигнала для 1310 нм, дБ

На погонной длине	0,35	По умолчанию
На сварном соединении	0,10	По умолчанию
На разъемном соединении	0,20	По умолчанию

Падение сигнала для 1490 нм, дБ

На погонной длине	0,25	По умолчанию
На сварном соединении	0,10	По умолчанию
На разъемном соединении	0,20	По умолчанию

Оптимальные запасы затуханий, дБ

До нижней границы	1,00	По умолчанию
До верхней границы	0,00	По умолчанию

Параметры оборудования

Настройка трансиверов OLT

Аналогичен	Класс	Параметр Tx/Rx						
		Tx λ нм [?]	Tx max дБм [?]	Tx min дБм [?]	Rx λ нм [?]	Rx max дБм [?]	Rx min дБм [?]	
SFP-xPON 2,5 B+	B+	1490	5,00	1,00	1310	-8,00	-29,00	По умолчанию
SFP-xPON 2,5 C++	C++	1490	5,50	4,00	1310	-12,00	-32,00	По умолчанию
SFP-xPON 2,5 C+++	C+++	1490	10,00	7,00	1310	-12,00	-34,00	По умолчанию

Настройки абонентского терминала

Аналогичен	Параметр Tx/Rx						
	Tx λ нм [?]	Tx max дБм [?]	Tx min дБм [?]	Rx λ нм [?]	Rx max дБм [?]	Rx min дБм [?]	
NTU-1 rev.B	1310	5,00	0,50	1490	-4,00	-28,00	По умолчанию

Затухания на PLC-сплиттерах, дБ

Сплиттер	Затухание, дБ	
PLC4 09	7,30	По умолчанию
PLC8 09	10,50	По умолчанию
PLC16 09	13,50	По умолчанию
УСМ M3 PLC4	7,30	По умолчанию
УСМ M3 PLC8	10,50	По умолчанию
PLC4 20	7,30	По умолчанию
PLC8 20	10,50	По умолчанию
PLC16 20	13,50	По умолчанию
PLC32 20	17,10	По умолчанию
PLC64 20	20,30	По умолчанию

Сохранить настройки | Не сохранять

Рис. 3.1 Налаштування параметрів проєкту в “Rural Network Configurator”

Особливу увагу в проєкті приділено вибору кабельної продукції, оскільки умови підземної експлуатації висувають підвищені вимоги до захисту оптичного волокна. Для реалізації мережі в кабельній каналізації (захисних ПВХ/ПЕ трубах) обрано кабелі, конструкція яких відповідає міжнародному стандарту IEC 60794 [19]. Ключовим елементом конструкції є наявність бронепокриття з гофрованої сталевої стрічки, яке необхідне для захисту оптичного модуля від гризунів

(здатних пошкодити пластикову трубу), а також виконує функцію додаткового вологозахисного бар'єру.

На магістральній ділянці (Feeder) від вузла OLT до першого каскаду розгалуження використовується кабель типу ОКЛ-нг(А)-HF-12 (або аналог T-SO-12). Це 12-волоконний броньований кабель, призначений для прокладання в кабельній каналізації. Вибір оболонки з матеріалу, що не поширює горіння (HF), дозволяє заводити цей кабель безпосередньо в приміщення серверної [26]. Для розподільчих ділянок (Distribution) між вуличними колодязями обрано легкий броньований кабель типу ОКЛ-4 ємністю 4 волокна.

Підключення абонентів (ділянка Drop) здійснюється кабелем типу ОК-Drop-Round (круглий діелектричний або з легкою бронею). Він прокладається від вуличного колодязя до будинку абонента в індивідуальній захисній мікротрубці. Використання кабелю круглого перерізу, на відміну від плоского, забезпечує кращу герметизацію вводів у муфти та будинки, що є критичним для підземних комунікацій.

При проєктуванні підземної ВОЛЗ також враховано технологічні запаси кабелю. У налаштуваннях задано коефіцієнт укладки 1,02 (2%), що враховує хвилеподібне укладання кабелю в траншеї («змійку») та нерівності рельєфу згідно з рекомендаціями ДСТУ EN 50174-3 [18]. Крім того, передбачено фіксовані запаси в точках монтажу: 10-15 метрів на кожну муфту в колодязі та 5 метрів на введення в будинок. Запас у колодязі дозволяє витягнути муфту на поверхню для проведення зварювальних робіт у чистих умовах, що значно підвищує надійність з'єднань [18, 27].

3.3. Розрахунок оптичного бюджету та аналіз енергетичних параметрів

Оптичний бюджет визначається як допустиме сумарне загасання в тракті між оптичним лінійним терміналом (OLT) та абонентським терміналом (ONT) і використовується для перевірки того, що рівень потужності на вході приймача перебуває в межах чутливості та не перевищує порогів перевантаження, визначених для класу обладнання B+ [11]. Згідно з рекомендацією ITU-T G.984.2

[11], для побудови мережі обрано обладнання класу B+, що забезпечує оптичний бюджет 28 дБ. Це дозволяє реалізувати коефіцієнт розгалуження до 1:64.

Для виконання розрахунків прийнято найгірший сценарій (worst-case scenario) - підключення найбільш віддаленого абонента. Топологія мережі має каскадну структуру розгалуження 1×4 → 1×16 (сумарний поділ 1:64). Найдовший оптичний тракт складається з магістрального кабелю довжиною 1, 8 км, розподільчого кабелю довжиною 0,6 км та абонентського дроп-кабелю середньою довжиною 0,07 км. Як середовище передачі використовується одномодове волокно стандарту G.652.D [25] з розрахунковим коефіцієнтом загасання α = 0,35 дБ/км (для довжини хвилі 1310 нм).

Втрати на пасивних компонентах прийнято згідно з паспортними даними: 7,3 дБ для сплітера 1×4; 13,5 дБ для сплітера 1×16; 0,1 дБ на одне зварне з'єднання та 0,2 дБ на одне роз'ємне з'єднання типу SC/APC [26, 29].

Загальне загасання оптичної лінії $L_{\sum}$ обчислюється як сума втрат у всіх елементах тракту за формулою [1, 14]:

$$L_{\sum}=L_{каб}+L_{спл}+L_{звар}+L_{кон}\,, \tag{3.1}$$

де $L_{каб}$ - сумарні втрати в оптичних кабелях, $L_{спл}$ - втрати в сплітерах, $L_{звар}$ - втрати на зварюваннях, $L_{кон}$ - втрати на конекторах.

Виконаємо розрахунок втрат для найдовшої гілки мережі. Сумарна довжина волоконного тракту становить 1,8 + 0,6 + 0,07 ≈ 2,47 км, що дає втрати у кабелі $L_{каб}$ = 2,47 · 0,35 ≈ 0,86 дБ. Втрати на розгалуження складаються з внесків двох сплітерів: $L_{спл}$ = 7,3 + 13,5 =20,8 дБ. Комутаційні втрати включають 4 зварні з'єднання (4 × 0,1 = 0,4 дБ) та 2 конекторні з'єднання (2 × 0,2 = 0,4 дБ). Таким чином, сумарні втрати становлять:

$$L_{\sum}=0{,}86+20{,}8+0{,}4+0{,}4=22{,}46 \text{ дБ} \tag{3.2}$$

Результати розрахунку компонентів втрат зведено у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахунок оптичних втрат для каскадної схеми

Елемент тракту	Кількість/ довжина	Нормативні/прийняті втрати	Втрати, дБ
Кабелі (сумарно)	2,47 км	0,35 дБ/км	0,86
PLC-сплітери (1×4＋1×16)	2 шт.	7.3 + 13,5 дБ	20,8
Зварювання волокон	4 шт.	0,1 дБ/зварку	0,4
Конекторні з’єднання SC/APC	2 шт.	0,2 дБ/з’єднання	0,4
Сумарні оптичні втрати L_{Σ}			22,46

Наступним кроком є перевірка рівнів потужності (Power Level Verification). Необхідно переконатися, що реальна потужність сигналу на вході приймача (P_{rx}) знаходиться в межах його робочого діапазону (чутливості). Для класу B+ мінімальна вихідна потужність передавача OLT становить $P_{tx(min)}$ = +1,5 дБм, а чутливість приймача ONT дорівнює -27 дБм [11]. Розрахуємо рівень сигналу на вході найвіддаленішого ONT:

$$P_{rx}=P_{tx(min)}-L_{\Sigma}=+1{,}5-22{,}46=-20{,}96 \text{ дБм} \quad (3.3)$$

Отримане значення (-20,96 дБм) є значно вищим за поріг чутливості приймача (-27 дБм). Запас потужності (System Margin) становить:

$$M=P_{rx}-P_{sens}=-20{,}96-(-27)=6{,}04 \text{ дБ}. \quad (3.4)$$

Такий запас є достатнім для компенсації експлуатаційного старіння компонентів та можливих ремонтних вставок.

Окрім перевірки на загасання, критично важливою є перевірка на перевантаження (Overload Check) для абонентів, які розташовані найближче до станції OLT. Якщо сигнал буде занадто потужним, це може призвести до насичення фотодіода та виникнення помилок. Поріг перевантаження для класу B+ становить -8 дБм [11]. Розрахуємо мінімально можливе загасання L_{min} для

абонента, підключеного коротким патч-кордом (довжина волокна →0). У цьому випадку втрати вносять лише сплітери та конектори:

$$L_{min}=L_{спл}+L_{кон}=20,8+0,4=21,2 \text{ дБ} \quad (3.5)$$

Максимальна потужність передавача OLT становить $P_{tx(max)}$= +5,0 дБм. Тоді максимальний рівень сигналу на вході найближчого ONT:

$$P_{rx(max)}=P_{tx(max)}-L_{min}=5,0-21,2=16,2 \text{ дБм} \quad (3.6)$$

Отримане значення (-16,2 дБм) є меншим за поріг перевантаження (-8 дБм). Отже, умова $P_{rx}<P_{ovl}$ виконується. Це доводить, що використання додаткових оптичних атенюаторів для вирівнювання рівнів сигналів у мережі не потребується, оскільки пасивного загасання сплітерів достатньо для запобігання перевантаженню приймачів.

Таким чином, розрахунки підтверджують, що спроєктована мережа повністю відповідає вимогам стандарту ITU-T G.984.2 для класу B+ [11]. Енергетичні параметри системи знаходяться в межах норми як для найвіддаленіших, так і для найближчих абонентів, забезпечуючи надійну роботу обладнання без ризику втрати сигналу або пошкодження приймачів.

3.4 Побудова схеми мережі

Завершальним етапом проєктування є синтез усіх попередніх розрахунків та рішень у вигляді детальної структурної схеми та зведеної специфікації обладнання. На цьому етапі абстрактна логічна модель мережі трансформується у фізичну схему з’єднань, прив’язану до конкретних елементів інфраструктури котеджного містечка. Виконання цього етапу в середовищі спеціалізованого САПР дозволило автоматизувати процес трасування ліній, призначення типів кабелів та генерації звітної документації, що мінімізує ризик технічних помилок [22].

Процес побудови схеми розпочався з визначення місць розміщення вузлів комутації. Враховуючи обраний підземний спосіб прокладання, проєктування

здійснюється згідно з вимогами ДСТУ EN 50174-3 [18], які регламентують планування та практику монтажу кабельних систем поза будівлями. Проєктом передбачено розміщення пасивного обладнання в оглядових колодязях кабельної каналізації, що забезпечує захист лінійних споруд від механічних пошкоджень, впливу погодних умов та несанкціонованого доступу відповідно до норм законодавства, зокрема Закону України «Про електронні комунікації» [21]. Архітектура мережі реалізована за ієрархічним принципом, що включає магістральний, розподільчий та абонентський рівні. Від вузла агрегації OLT прокладено магістральну трасу до центрального розподільчого колодязя. Програмний комплекс автоматично призначив для цієї ділянки броньований кабель типу ОКЛ-нг(А)-HF-12, конструкція якого відповідає вимогам міжнародного стандарту IEC 60794 [19] щодо стійкості до зовнішніх впливів та захисту від гризунів.

У центральному колодязі розміщується магістральна оптична муфта з першим каскадом сплітерів (1 × 4). Від неї розходяться розподільчі траси до локальних вуличних колодязів, для яких призначено легкий броньований кабель ОКЛ-4, що також відповідає специфікаціям IEC 60794 [19]. Від вуличних колодязів, де встановлені сплітери другого каскаду (1 × 16), трасуються індивідуальні вводи до будинків кабелем ОК-Drop-Round. Цей тип кабелю забезпечує надійну герметизацію вводів, що є критичним для підземних вводів та експлуатації [18, 27].

Коректність призначення типів кабелів та їх відповідність ділянкам мережі підтверджується автоматично згенерованим звітом програмного комплексу, наведеним на рисунку 3.2.

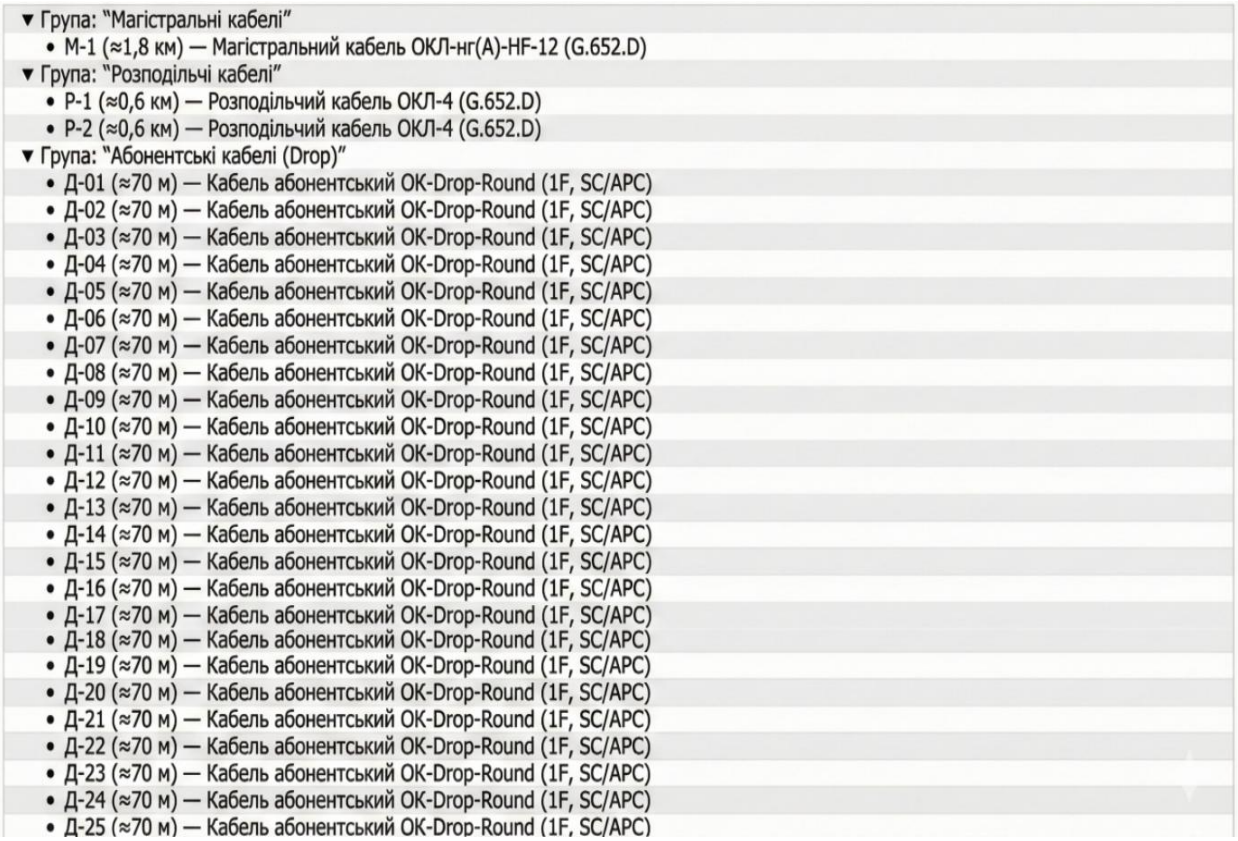


Рис. 3.2 Інтерфейс призначення типів кабелів для ділянок мережі в САПР

На основі трасування ліній сформовано загальну структурну схему мережі (рис. 3.3), яка відображає логіку проходження оптичного сигналу від порту OLT до терміналу користувача. Схема ілюструє реалізацію каскадної архітектури 1 × 4 → 1 × 16 , що була обрана як оптимальна для даної конфігурації забудови. Ключовими елементами схеми є OLT, що генерує сигнал на довжинах хвиль 1490/1310 нм, магістральна муфта як вузол першого розгалуження, вуличні розподільчі бокси (колодязі) як вузли другого розгалуження та абонентські термінали ONT [11, 5].

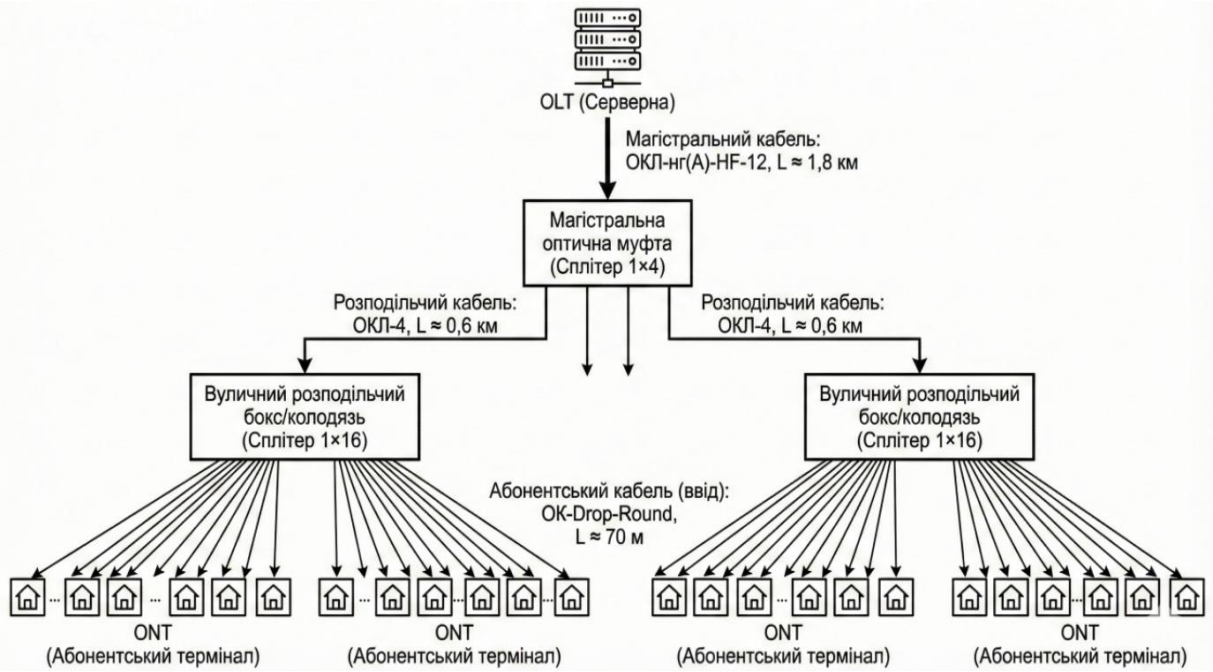


Рис. 3.3 Загальна структурна схема підземної GPON-мережі (каскад 1 × 4 → 1 × 16)

Запропонована схема повністю відповідає вимогам стандарту ITU-T G.984.1 [5] щодо архітектури мереж доступу та загальних характеристик GPON. Використання підземних муфт та боксів забезпечує високу експлуатаційну надійність мережі, оскільки всі пасивні компоненти знаходяться в захищеному середовищі зі стабільним температурним режимом.

Фінальним кроком є генерація зведеної специфікації обладнання та матеріалів (Bill of Materials - BOM). Програмний комплекс автоматично виконує підрахунок довжин усіх сегментів кабельної мережі, враховуючи налаштовані коефіцієнти технологічних запасів на укладку (1,02) та монтажні запаси в колодязях і на вводах (див. підрозділ 3.2). До специфікації включено компоненти, що відповідають технічним вимогам до підземної прокладки: кабелі з бронепокриттям, герметичні муфти та захищені розподільчі бокси [18].

Отримана специфікація є основою для складання кошторисної документації та планування логістики. Використання уніфікованих типів кабелів та сплітерів дозволяє спростити процес закупівлі та монтажних робіт.

Детальна специфікація обладнання та матеріалів, необхідних для реалізації розробленої схеми, наведена у наступному підрозділі в Таблиці 3.4

3.5 Специфікація обладнання та матеріалів

Формування зведеної специфікації (Bill of Materials - BOM) є підсумковим етапом технічного проєктування, який узагальнює результати вибору топології, трасування ліній та розрахунку оптичного бюджету. Цей документ є базою для кошторисного розрахунку вартості будівництва мережі та планування логістичних процесів. Специфікація для котеджного містечка «Простір Свободи» була згенерована в автоматизованому режимі засобами спеціалізованого САПР на основі створеної структурної схеми, що дозволило точно врахувати довжини кабелів, технологічні запаси на укладку та монтаж, а також необхідну кількість комутаційних елементів.

При виборі номенклатури пасивних компонентів лінійно-кабельних споруд (ODN) визначальним фактором став обраний підземний спосіб прокладання в кабельній каналізації. Відповідно до вимог міжнародного стандарту IEC 60794 [19], для таких умов експлуатації передбачено використання волоконно-оптичних кабелів із посиленим захистом від механічних пошкоджень, вологи та гризунів. Для магістральної ділянки мережі до специфікації включено броньований кабель типу ОКЛ-нг(А)-HF-12, який містить гофровану сталеву стрічку та оболонку з матеріалу, що не поширює горіння. Загальна довжина магістрального кабелю розрахована з урахуванням коефіцієнта укладки 1,02 та запасів у колодязях і становить 1,85 км. Для розподільчих ділянок між вуличними вузлами обрано аналогічний за конструкцією, але меншої ємності кабель ОКЛ-4, загальною довжиною 0,65 км. Абонентські вводи виконуються спеціалізованим кабелем круглого перерізу ОК-Drop-Round, конструкція якого дозволяє забезпечити герметизацію вводів у муфти та будинки, що є критичним для підземних комунікацій [18, 27]. Абонентські відводи виконано кабелем із волокном типу G.657.A1 [30], що є сумісним із G.652.D і краще пристосованим до малих радіусів вигину в умовах введення в будівлю.

Комутація та розгалуження оптичних волокон здійснюються в захищених муфтах, що відповідають вимогам ДСТУ EN 50174-3 [18] щодо стійкості до факторів навколишнього середовища. У специфікації передбачено використання тупикової оптичної муфти типу FOSC (або аналог) з класом захисту IP68 для розміщення магістрального сплітера 1×4. Для вуличних вузлів розподілу обрано герметичні оптичні бокси (кроси) FOB-D, які дозволяють розмістити сплітери другого каскаду 1×16 та забезпечити зручну комутацію абонентів. Усі з'єднання волокон виконуються методом зварювання з використанням термоусаджувальних гільз (КДЗС), а підключення активного обладнання та сплітерів - через конектори типу SC/APC, що забезпечують мінімальні зворотні втрати [20].

Склад активного обладнання визначено на основі розрахунку оптичного бюджету та необхідної пропускної здатності. Для станційної сторони передбачено оптичний трансивер форм-фактору SFP класу B+, який забезпечує бюджет потужності 28 дБ згідно з рекомендацією ITU-T G.984.2 [11]. На стороні абонентів специфіковано 25 терміналів ONT з підтримкою гігабітного інтерфейсу та Wi-Fi, що відповідає концепції надання послуг Triple Play.

Формування зведеної специфікації матеріалів та обладнання (Bill of Materials, BOM) є підсумковим етапом технічного проєктування, що узагальнює результати вибору топології, трасування ліній та розрахунку оптичного бюджету. Специфікацію сформовано в автоматизованому режимі засобами спеціалізованого САПР на основі побудованої структурної схеми мережі та параметрів підземного прокладання (коефіцієнт запасу на укладку, монтажні запаси в колодязях і на вводах).

У поточному проєкті задіяно два виходи сплітера 1×4 для підключення двох розподільчих вузлів зі сплітерами 1×16; два інші виходи залишено резервними для подальшого розширення. Узагальнена відомість основного обладнання та матеріалів, необхідних для реалізації проєкту, наведена в таблиці 3.3

Таблиця 3.3

Специфікація основного обладнання та матеріалів проєкту

з/п	Найменування обладнання / матеріалу	Тип / Маркування	Од. вим.	Кіль кість	Примітка
1	**Кабельно-провідникова продукція**				
1.1	Кабель оптичний магістральний (12 волокон), броньований	ОКЛ-нг(А)-HF-12 (G.652.D)	км	1,85	IEC 60794 [19]
1.2	Кабель оптичний розподільчий (4 волокна), броньований	ОКЛ-4 (G.652.D)	км	0,65	IEC 60794 [19]
1.3	Кабель абонентський (Drop), круглий	OK-Drop-Round G.657.A1	км	1,8	25 аб. × 70 м + запас [30]
2	**Пасивні компоненти (ODN)**				
2.1	Сплітер оптичний планарний (PLC)	PLC 1 × 4 SC/APC	шт.	1	Безкорпусний / міні
2.2	Сплітер оптичний планарний (PLC)	PLC 1 × 16 SC/APC	шт.	2	У корпусі / касетний
2.3	Муфта оптична тупикова (для колодязя)	FOSC-400 (IP68)	шт.	1	Магістральний вузол
2.4	Бокс оптичний розподільчий	FOB-D(вуличний/підземний)	шт.	2	Розподільчі вузли
2.5	Гільза захисна (КДЗС)	60 мм	шт.	60	Комплект
2.6	Пігтейли та патч-корди	SC/APC	шт.	30	Монтажний комплект
3	**Активне обладнання**				
3.1	Трансивер оптичний OLT	SFP GPON Class B+	шт.	1	G.984.2 [11]
3.2	Абонентський термінал	ONT GPON (1GE+Wi-Fi)	шт.	25	Клієнтський пристрій

Наведена специфікація охоплює всі основні компоненти, необхідні для реалізації запроєктованої GPON-мережі.

3.6 Техніко-економічне обґрунтування проєкту

Впровадження волоконно-оптичної мережі доступу в умовах котеджного містечка потребує вибору архітектури та технології, що забезпечують оптимальне

співвідношення між капітальними витратами (CAPEX), операційними витратами (OPEX) та довгостроковою надійністю мережі. Запропоноване проєктне рішення на основі технології GPON демонструє високу економічну доцільність завдяки поєднанню пасивної архітектури [5], раціонального використання волоконно-оптичної інфраструктури та застосування засобів автоматизованого проєктування.

Ефективність вибраної архітектури.

Застосування технології PON дозволило мінімізувати кількість активного обладнання у вузлах розподілу. Усі проміжні точки мережі виконані у вигляді пасивних муфт зі сплітерами, що не потребують електроживлення. Це усуває необхідність встановлення вуличних шаф з системами клімат-контролю та джерелами безперебійного живлення, що, за оцінками галузевих матеріалів, може зменшувати поточні експлуатаційні витрати (OPEX) на 50-70% порівняно з традиційними рішеннями [31].

Оптимізація кабельної інфраструктури.

Використання каскадного розгалуження 1×4 → 1×16 забезпечило значну економію оптичного волокна. Розташування першого каскаду (1×4) у головній магістральній муфті дозволило передавати сигнал від OLT по одному 12-волоконному кабелю без необхідності прокладання окремих магістральних ліній до кожної вулиці. Загальний коефіцієнт розгалуження 1:64 забезпечує ефективне використання портів обладнання OLT: для підключення 25 абонентів задіяно лише один порт SFP із резервом ємності для подальшого розширення мережі без додаткових капітальних витрат.

Економічна доцільність вибору класу оптичних модулів.

У проєкті обґрунтовано застосування оптичних модулів класу B+. Це рішення є оптимальним з економічної точки зору, оскільки модулі B+ мають нижчу вартість порівняно з модулями класу C+ при достатньому рівні оптичного бюджету (28 дБ). Розрахунки, наведені у підрозділі 3.3, підтвердили, що цей бюджет забезпечує впевнене функціонування мережі на максимальних відстанях у межах проєктної ділянки з запасом понад 6 дБ. Використання модулі B+ мають нижчу вартість порівняно з модулями класу C+ [19, 32].

Зниження витрат за рахунок автоматизації проєктування.

Застосування програмного комплексу «Rural Network Configurator» сприяло оптимізації матеріальних та трудових ресурсів на етапі планування. Автоматична генерація специфікації (BOM) дала змогу точно визначити кількість кабелю, муфт та сплітерів, зменшивши ймовірність закупівлі надлишкових матеріалів. Точний розрахунок довжин кабелів дозволив зменшити технологічні відходи (обрізки) до мінімуму (закладено запас лише 2%), що позитивно впливає на загальну вартість реалізації мережі [18, 22].

Переваги підземного способу прокладання кабелю.

Попри те, що підземна прокладка в кабельній каналізації має вищі початкові витрати на матеріали (броньований кабель) порівняно з повітряними лініями, вона забезпечує економічну вигоду у довгостроковій перспективі. Підземні лінії не піддаються впливу вітрових навантажень, обледеніння та падіння дерев, що мінімізує кількість аварійних ситуацій. Це гарантує високі показники доступності сервісу (SLA) та стабільність доходів оператора, що є критичним фактором для мереж у приватному секторі [27].

Розрахунок капітальних витрат (CAPEX).

Для кількісної оцінки вартості будівництва лінійної частини мережі та підключення абонентів сформовано кошторис основного обладнання й матеріалів. Узагальнені результати розрахунку наведено в таблиця 3.4, де для кожної позиції вказано найменування, одиницю виміру, кількість, орієнтовну ціну за одиницю та підсумкову вартість. Розрахунок виконано на основі сформованої специфікації (BOM) та прийнятих проєктних рішень (тип кабелю, кількість муфт і сплітерів, комплект абонентського підключення), що забезпечує прозорість і відтворюваність економічної оцінки. Ціни наведено станом на поточний період і є орієнтовними роздрібними значеннями.

Таблиця 3.4

Розрахунок вартості обладнання та матеріалів проєкту

№	Найменування	Од. вим.	Кільк.	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	Кабель магістральний ОКЛ-нг(А)-HF-12	км	1,85	24 000	44 400
2	Кабель розподільчий ОКЛ-4	км	0,65	16 000	10 400
3	Кабель абонентський OK-Drop-Round	км	1,8	7 000	12 600
4	Сплітер PLC 1×4 (безкорпусний)	шт.	1	350	350
5	Сплітер PLC 1×16 (касетний)	шт.	2	800	1 600
6	Муфта оптична тупикова FOSC-400	шт.	1	1 200	1 200
7	Бокс розподільчий FOB-D	шт.	2	600	1 200
8	Комплект витратних матеріалів (гільзи, пігтейли, кріплення)	компл.	1	4 000	4 000
9	Трансивер SFP GPON Class B+	шт.	1	1 800	1 800
10	Абонентський термінал ONT GPON (Wi-Fi)	шт.	25	1 200	30 000

Згідно з розрахунками, капітальні інвестиції в обладнання становлять 107 550 грн. Питомі витрати на одного абонента (Cost Per Subscriber) при повному підключенні 25 будинків складають:

$$\frac{107550 \text{ грн}}{25} = 4302 \text{ грн.}$$

Цей показник є конкурентним для практики підключення FTTH у приватному секторі в Україні, оскільки умови та вартість підключення залежать від провайдера і конкретної пропозиції (зокрема акційних умов і складу робіт) та можуть варіюватися від безкоштовного/символічного підключення до фіксованої оплати у кілька тисяч гривень.

Враховуючи, що модель надання абонентського обладнання ONU/ONT також залежить від провайдера (може входити до вартості підключення або надаватися/оплачуватися окремо), термін окупності проєкту оцінюється як прийнятний для оператора [33, 34, 35, 36].

3.7 Порівняння проєктного рішення з альтернативними варіантами

Для оцінювання доцільності вибору технології GPON виконано порівняння з альтернативними рішеннями широкосмугового доступу, що можуть застосовуватися в умовах котеджної забудови: EPON (IEEE 802.3ah) та Active Ethernet (P2P) [8, 2].

Порівняння проведено за техніко-економічними та експлуатаційними критеріями: пропускна здатність, ефективність використання смуги, потреба у волоконно-оптичних ресурсах, енергозалежність активних вузлів, складність обслуговування та можливість модернізації. Результати порівняння наведено в табл. 3.5 [11, 8, 2, 10].

Таблиця 3.5

Порівняння варіантів побудови мережі доступу

Критерій порівняння	Проєктне рішення (GPON)	EPON	Active Ethernet (P2P)
Архітектура мережі	Пасивна (P2MP)	Пасивна (P2MP)	Активна / P2P
Швидкість (Downstream)	2,5 Гбіт/с	1,25 Гбіт/с	1 Гбіт/с (на порт)
Ефективність використання сму	Висока	Висока	Висока
Витрати волокна	Низькі (1 волокно на 64 аб.)	Середні (1 волокно на 32 аб.)	Високі (1 волокно на 1 аб.)
Надійність (залежність від живлення)	Висока (пасивна ODN)	Висока (пасивна ODN)	Низька (активні вузли)
Складність обслуговування	Середня	Середня	Висока (багато активних точок)
Можливість модернізації (до 10G)	Висока (XGS-PON сумісний [10])	Обмежена	Висока (заміна комутаторів)

Порівняння з EPON.

EPON є близьким функціональним аналогом GPON, однак у базовій реалізації забезпечує нижчу пропускну здатність низхідного каналу (1,25 Гбіт/с проти 2,5 Гбіт/с у GPON), що зменшує запас продуктивності для сервісів IPTV/4K та

перспективного зростання трафіку. Крім того, при однакових умовах розгалуження та кількості абонентів GPON, як правило, забезпечує кращі можливості керування смугою та сервісною диференціацією (DBA/QoS), що важливо для мультисервісного доступу.

Порівняння з Active Ethernet (P2P).

Архітектура P2P передбачає індивідуальне підключення абонента окремим волоконно-оптичним трактом (або парою волокон), а також потребує встановлення проміжних активних вузлів комутації або суттєвої кількості волокон до точки агрегації. Це підвищує капітальні витрати на кабельну інфраструктуру та збільшує енергозалежність і складність експлуатації порівняно з пасивною ODN.

Порівняльний аналіз підтверджує доцільність вибору GPON для умов котеджного містечка завдяки поєднанню високої пропускної здатності, пасивної архітектури розподільної мережі та кращого балансу між витратами на кабельну інфраструктуру й експлуатаційними витратами.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання підвищення ефективності проєктування пасивних оптичних мереж доступу для приватної малоповерхової забудови шляхом обґрунтування вибору технології, автоматизації інженерних розрахунків і розроблення практичного проєкту мережі GPON.

За результатами порівняльного аналізу технологій доступу (xDSL, DOCSIS, Active Ethernet (P2P), EPON, GPON) обґрунтовано доцільність застосування GPON для котеджного містечка з огляду на пропускну здатність, ефективне використання волоконних ресурсів і переваги пасивної архітектури.

Підтверджено ефективність автоматизованого проєктування із застосуванням «Rural Network Configurator», який забезпечив трасування кабельних ліній, розрахунок оптичного бюджету та формування специфікації обладнання й матеріалів, зменшивши трудомісткість і вплив людського фактора.

Розроблено проєкт GPON-мережі для котеджного містечка «Простір Свободи» на 25 абонентів із каскадною топологією 1×4 → 1×16 та підземним прокладанням у кабельній каналізації, а також обґрунтовано вибір кабельної продукції та компонентів ODN відповідно до вимог нормативних документів.

Розрахунок оптичного бюджету для найгіршого сценарію показав сумарні втрати 22,46 дБ, що не перевищує допустиме значення для класу B+ (28 дБ), а запас потужності 6,04 дБ забезпечує стабільну роботу мережі.

Техніко-економічне оцінювання підтвердило доцільність запропонованого рішення, при цьому орієнтовні питомі витрати на одного абонента становлять близько 4 300 грн.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Волоконно-оптичні системи передачі даних : навч. посіб. - Київ : КНУТД, 2020.

2. Cisco Systems. Introduction to GPON Technology : White Paper. - 2019.

3. FTTH Council Europe. FTTH/B Market Panorama 2023 [Електронний ресурс]. - Brussels : FTTH Council Europe, 2023. - Режим доступу: локальний файл. - Дата звернення: 21.12.2025.

4. Energy-efficient Design of PON Networks: Review and Trends // Optics Communications. - 2022. - Vol. 508. - Article 127338. - DOI: 10.1016/j.optcom.2022.127338.

5. ITU-T Recommendation G.984.1. GPON: General Characteristics. - Geneva : ITU, 2008.

6. Бондар М., Литвин В. Особливості побудови PON-мереж у приватному секторі [Електронний ресурс]. - 2021. - Режим доступу: локальний файл.

7. ETSI TS 101 548 V1.1.1. Access network transport aspects for PON. - ETSI, 2021.

8. IEEE Std 802.3ah-2004. IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications - Amendment: Ethernet in the First Mile. - IEEE, 2004.

9. ITU-T Recommendation G.987.1. 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements. - Geneva : ITU, 2010.

10. ITU-T Recommendation G.9807.1. 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON). - Geneva : ITU, 2016.

11. ITU-T Recommendation G.984.2. GPON: Physical Media Dependent (PMD) layer specification. - Geneva : ITU, 2019.

12. Кузьменко О. В., Баранов В. А. Проєктування систем передачі на основі технології GPON // Сучасні інформаційні системи. - 2021. - № 3(27). - С. 55–62.

13. ITU-T Recommendation G.984.3. GPON: Transmission Convergence (TC) layer specification. - Geneva : ITU, 2014.

14. Струк В. В., Дубовий І. В. Енергетичний розрахунок оптичної лінії передачі. - Чернівці : Рута, 2020.

15. Ковальчук В., Семенюк І. Методи зменшення загасання у волоконно-оптичних лініях зв’язку [Електронний ресурс]. - 2022. - Режим доступу: локальний файл.

16. ITU-T Recommendation G.984.4. GPON: ONT management and control interface (OMCI). - Geneva : ITU, 2008.

17. ITU-T Recommendation L.110. Optical fibre cables for direct surface application. - Geneva : ITU, 2017.

18. ДСТУ EN 50174-3:2022. Інформаційні технології. Монтаж кабельних систем. Частина 3: Планування та монтаж кабельних систем поза будівлями. - 2022.

19. IEC 60794-1-21:2015. Optical fibre cables - Part 1-21: Generic specification - Basic optical cable test procedures - Mechanical test methods. - IEC, 2015.

20. IEC 61754-4:2022. Fibre optic interconnecting devices and passive components - Fibre optic connector interfaces - Part 4: Type SC connector family. - IEC, 2022.

21. Закон України «Про електронні комунікації» №1089-IX від 16.12.2020 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: локальний файл.

22. Rural Network Configurator. Офіційна документація [Електронний ресурс]. - 2022. - Режим доступу: локальний файл. - Дата звернення: 21.12.2025.

23. FTTH Council Europe - Comsof Fiber (product sheet) [Електронний ресурс]. - 2023. - Режим доступу: локальний файл. - Дата звернення: 21.12.2025.

24. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. - 4th ed. - Cambridge, MA : The MIT Press, 2022. - ISBN 978-0262046305.

25. ITU-T Recommendation G.652 (08/2024). Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. - Geneva : ITU, 2024.

26. Huawei Technologies Co. Ltd. FTTx Planning and Design Guide. - 2020.

27. Соколенко І. Г. Особливості підземного прокладання волоконно-оптичних ліній // Телекомунікаційні та інформаційні технології. - 2022. - № 3.

28. ITU-T Recommendation G.694.2 (12/2003). Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid. - Geneva : ITU, 2003.

29. FS.com. Bare Fiber PLC Splitters - Datasheet [Електронний ресурс]. - 2025. - Режим доступу: локальний файл. - Дата звернення: 21.12.2025.

30. ITU-T Recommendation G.657 (08/2024). Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable. - Geneva : ITU, 2024.

31. Mechdyne Corporation. Passive Optical LAN White Paper [Електронний ресурс]. - 2020. - Режим доступу: локальний файл.

32. Comtrade Ukraine. SFP модулі/трансивери Ubiquiti (каталог): позиції UF-GP-B+ та UF-GP-C+ із цінами [Електронний ресурс]. - 2025. - Режим доступу: локальний файл.

33. Мережа Ланет (Lanet). Тариф/умови підключення (вказано «Підключення 2499») [Електронний ресурс]. - 2025. - Режим доступу: локальний файл.

34. UTELS. Перевірка покриття / умови підключення (вказано «+ Підключення 1 ₴», ONU у складі) [Електронний ресурс]. - 2025. - Режим доступу: локальний файл.

35. Київстар. Домашній Інтернет (вказано «Безкоштовне підключення») [Електронний ресурс]. - 2025. - Режим доступу: локальний файл

36. Datagroup-Volia. Оптичний інтернет / тарифна пропозиція (умови підключення) [Електронний ресурс]. - 2023. - Режим доступу: локальний файл. -

ПРЕЗЕНТАЦІЯ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:

СТВОРЕННЯ ПАСИВНОЇ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ КОТЕДЖНОГО МІСТЕЧКА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Студент: Вийтів Сергій Тарасович
гр. ТСДМ-61
Науковий керівник: Градобоєва Н.В.
Спеціальність: 172 Телекомунікації і радіотехніка

Київ - 2025

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ РОБОТИ

- Невідповідність існуючих мереж: Традиційні мідні технології (xDSL) вичерпали свій ресурс і не забезпечують потреб сучасних сервісів (4K, IoT, Cloud).
- Специфіка приватної забудови: Котеджні містечка характеризуються значною протяжністю ліній та складністю інфраструктури, що підвищує вартість будівництва.
- Проблема «ручного» проєктування: Традиційні методи розрахунків є трудомісткими та призводять до помилок в оптичному бюджеті (поява «мертвих зон»).
- Рішення: Впровадження технології GPON та спеціалізованих засобів автоматизації (САПР) для оптимізації техніко-економічних показників проєкту.

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Мета: Підвищення ефективності та якості проєктування мережі GPON для котеджного містечка шляхом застосування спеціалізованих засобів автоматизації.

Об'єкт дослідження: Процес побудови та проєктування пасивних оптичних мереж доступу в районах приватної забудови.

Предмет дослідження: Методи, моделі та програмні засоби автоматизації проєктування мереж технології GPON.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСТУПУ

xDSL: обмежена швидкість і залежність від довжини мідної лінії.

Active Ethernet (P2P): висока витрата волокна та складніша експлуатація через активні вузли.

EPON: нижча пропускна здатність у низхідному каналі порівняно з GPON.

GPON: пасивна ODN зменшує енергозалежність проміжних вузлів і підвищує надійність.

Ресурси: GPON забезпечує ефективніше використання волоконної інфраструктури при підключенні абонентів.

Висновок: GPON — оптимальний вибір для котеджного містечка за критеріями «Вартість–Надійність–Якість».

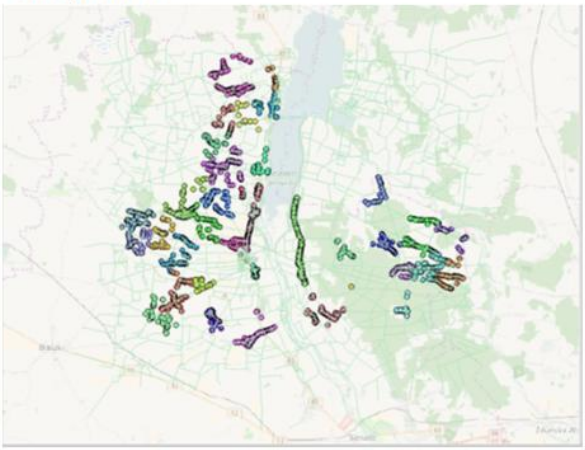
Порівняльний аналіз технологій пасивних оптичних мереж

Критерій	GPON (проєкт)	EPON	Active Ethernet (P2P)
Архітектура мережі	Пасивна (P2MP)	Пасивна (P2MP)	Активна / P2P
Швидкість (Downstream)	2,5 Гбіт/с	1,25 Гбіт/с	1 Гбіт/с (на порт)
Витрати волокна	Низькі (1 волокно на 64 аб.)	Середні (1 волокно на 32 аб.)	Високі (1 волокно на 1 аб.)
Надійність (залежність від живлення)	Висока (пасивна ODN)	Висока (пасивна ODN)	Низька (активні вузли)
Складність обслуговування	Середня	Середня	Висока (багато активних точок)
Модернізація (до 10G)	Висока (XGS-PON сумісний)	Обмежена	Висока (заміна комутаторів)

ПРОБЛЕМА: ЧОМУ РУЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ - НЕЕФЕКТИВНЕ?

- Висока трудомісткість: Розрахунок каскадних схем (1 × 4 → 1 × 16) вручну займає багато часу.
- Ризик інженерних помилок: "Людський фактор" при підрахунках призводить до появи «мертвих зон» (де сигнал нижче норми).
- Складність актуалізації: Будь-яка зміна топології (наприклад, додавання вулиці) вимагає повного перерахунку проєкту.
- Розрізненість даних: Відсутність зв'язку між графікою (AutoCAD) та кошторисом (Excel).
- Рішення: Впровадження спеціалізованих САПР дозволяє скоротити час проєктування на 40–60%.

На зображенні наведено приклад планування мережі. Він показує карту з точками, що ілюструє складність "ручного" розміщення вузлів на реальній місцевості.



ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПЗ «RURAL NETWORK CONFIGURATOR»

Недоліки універсальних САПР (AutoCAD): Відсутність інженерного інтелекту (не рахує втрати, не перевіряє зв'язність).
Недоліки систем моделювання (OptiSystem): Надлишкова складність для задач топологічного планування.
Переваги обраного ПЗ «Rural Network Configurator»:

- Робота з реальними геоданими (GIS).
- Автоматизований розрахунок оптичного бюджету (згідно з G.984).
- Оптимальне трасування ліній та автоматична генерація специфікації (BOM).



ОБ'ЄКТ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ТОПОЛОГІЯ МЕРЕЖІ

Об'єкт: Котеджне містечко «Простір Свободи» (розрахункова ємність – 25 абонентів).

Топологія: Ієрархічна каскадна («Дерево»).

Схема розгалуження:

- 1-й рівень: Сплітер 1 × 4 (у магістральній муфті).
- 2-й рівень: Сплітер 1 × 16 (у розподільчих колодязях).
- Загальний коефіцієнт: 1:64 (забезпечує резерв ємності для майбутніх підключень).

Трасування ліній на місцевості



ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЄКТУ

Спосіб прокладання: Підземний (у кабельній каналізації) — забезпечує захист від погодних умов та вандалізму .
Кабельна інфраструктура:
Магістраль: Броньований кабель ОКЛ-нг(А)-HF-12 (12 волокон, негорюча оболонка) .
Абонентський ввід: Кабель OK-Drop-Round (круглий переріз для герметичності) .
Комутація:
Тип з'єднань: SC/APC (зелені). Забезпечують мінімальні зворотні втрати (-60 дБ), що важливо для надійності .

- Група: "Магістральні кабелі"
  - М-1 (≈1,8 км) — Магістральний кабель ОКЛ-нг(А)-HF-12 (G.652.D)
- Група: "Розподільчі кабелі"
  - Р-1 (≈0,6 км) — Розподільчий кабель ОКЛ-4 (G.652.D)
  - Р-2 (≈0,6 км) — Розподільчий кабель ОКЛ-4 (G.652.D)
- Група: "Абонентські кабелі (Drop)"
  - Д-01 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-02 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-03 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-04 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-05 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-06 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-07 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-08 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-09 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-10 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-11 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-12 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-13 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-14 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-15 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-16 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-17 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-18 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-19 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-20 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-21 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-22 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-23 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-24 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)
  - Д-25 (≈70 м) — Кабель абонентський OK-Drop-Round (1F, SC/APC)

РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОГО БЮДЖЕТУ

Основні параметри:
Клас обладнання: ODN Class B+.
Допустимий бюджет втрат: 28,0 дБ.
Розрахунок для найгіршого сценарію (найвіддаленіший абонент, 2.47 км).

Результати розрахунку:
Втрати в кабелі та з'єднаннях: ~1,66 дБ.
Втрати на сплітерах (1 × 4 → 1 × 16): 20,8 дБ.
СУМАРНІ ВТРАТИ (L_Σ): 22,46 дБ.

Розрахунок оптичних втрат для каскадної схеми

Елемент тракту	Кількість / довжина	Нормативні/прийняті втрати	Втрати, дБ
Кабелі (сумарно)	2,47 км	0,35 дБ/км	0,86
PLC-сплітери (1×4 + 1×16)	2 шт.	7.3 + 13,5 дБ	20,8
Зварювання волокон	4 шт.	0,1 дБ/зварку	0,4
Конекторні з'єднання SC/APC	2 шт.	0,2 дБ/з'єднання	0,4
Сумарні оптичні втрати L_Σ	-	-	22,46

Висновок:
Експлуатаційний запас потужності: 6,04 дБ.
Запас достатній для надійної роботи з урахуванням старіння та температурних коливань.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЄКТУ

Сформовано повну специфікацію обладнання та матеріалів (Bill of Materials).

Капітальні витрати (CAPEX) на обладнання:107 550 грн.

Розрахункова вартість підключення 1 абонента: 107550/25аб. ≈ 4.300грн

Висновок: Вартість є конкурентною для ринку України та відповідає типовим ринковим рівням для FTTH у приватному секторі.



ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЄКТНОГО РІШЕННЯ

GPON vs EPON vs Active Ethernet (P2P):
Архітектура: GPON/EPON - пасивна (P2MP), P2P - активна.
Downstream: GPON 2,5; EPON 1,25; P2P 1 Гбіт/с (на порт).
Волокно: GPON 1/64 аб., EPON 1/32 аб., P2P 1/1 аб.
Надійність: GPON/EPON - висока (пасивна ODN), P2P - нижча (активні вузли).
Обслуговування: GPON/EPON - середнє, P2P - складніше (багато активних точок).
Модернізація до 10G: GPON - висока (XGS-PON), EPON - обмежена, P2P - висока (заміна комутаторів).
Висновок: GPON - оптимум за критеріями «Вартість-Надійність-Якість».

Порівняння варіантів побудови мережі доступу

Критерій	GPON (проєкт)	EPON	Active Ethernet (P2P)
Архітектура мережі	Пасивна (P2MP)	Пасивна (P2MP)	Активна / P2P
Швидкість (Downstream)	2,5 Гбіт/с	1,25 Гбіт/с	1 Гбіт/с (на порт)
Витрати волокна	Низькі (1 волокно на 64 аб.)	Середні (1 волокно на 32 аб.)	Високі (1 волокно на 1 аб.)
Надійність (залежність від живлення)	Висока (пасивна ODN)	Висока (пасивна ODN)	Низька (активні вузли)
Складність обслуговування	Середня	Середня	Висока (багато активних точок)
Модернізація (до 10G)	Висока (XGS-PON сумісний)	Обмежена	Висока (заміна комутаторів)

ВИСНОВКИ

Зроблено проект пасивної оптичної мережі в реальної сільської місцевості з використанням конфігуратора пасивних оптичних мереж - це використання автоматизованої системи проектування мережі. Показане, що за допомогою конфігуратора мережі можна достатньо швидко та просто створити проект PON і оптимізувати проектні рішення.

Створене креслення мережі, прокладені траси оптичного кабелю по опорах існуючої повітряної лінії освітлення, а також виконані інші необхідні розділи проекту; проведені розрахунки оптичного бюджету потужності та бюджету оптичних втрат.

Одержані результати можна використовувати для будівництва пасивної оптичної мережі доступу.

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Сергій ВИЙТІВ

Назва: СТВОРЕННЯ ПАСИВНОЇ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ КОТЕДЖНОГО МІСТЕЧКА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Координатор: Неля ГРАДОБОЄВА

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:0.2

Коефіцієнт подібності 2:0

Тривога: 15

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*